5e série, tome II, n° 19. Juillet 1932

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

COMPTE RENDU DES REUNIONS

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE
du Mercredi 4 Mai 1932

Présidence de M. JOUAUST

La Séance est ouverte à 20 h. 30.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admissions suivantes :

MM.

Arragon (Henri-Georges-Antoine), ingénieur-conseil, 18, boulevard d'Arcole, à Toulouse (Haute-Garonne). — Présenté par MM. Chaumat et Gaumy.

Astruc (Raymond-Joseph), élève à l'E. S. E., 158, rue de Paris, à Vanves (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Barbezat (Edouard), gérant de la Société Oerlikon, à Lyon, 9, quai Tilsitt, à Lyon (Rhône). — Présenté par MM. Dumont et A. Roth.

Baunat (Roger-Jean-Louis-François-Michel), ingénieur électricien de l'Ecole Spéciale des Travaux publics, 13, rue Jeanne-Hachette, à Paris (15e). — Présenté par MM. de la Jarrige et Raynaud.

Benoit Gonin (Louis), ingénieur-conseil E. S. E., 113, boulevard Exelmans, à Paris (16e). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Brinch (Reidar), élève à l'E. S. E., 9, avenue Pierre-Larousse, à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Cazet (André-Marie), asp. électr. au service du matériel fixe électrique du chemin de fer métropolitain, 32, rue Guyot, à Paris (17e). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Chidel (Simon), employé aux Etablissements Clémançon, 15, rue Lamartine, à Paris (9e). — Présenté par MM. Grosselin et Doizan.

Colson (Georges-Julien-Victor), administrateur délégué des Forges et Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont, 64, boulevard de Courcelles, à Paris (17e). — Présenté par MM. M. Ulrich et Viard.

Coulombel (André), avenue du Quinconce, à Péronne (Somme). — Présenté par MM. Janet et Chaumat.

Fertey (Eugène-Louis-Charles), ingénieur civil de D. N., élève à l'E. S. E., 17, avenue de Bourg-la-Reine, à Fontenay-aux-Roses (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Fleury (Pierre), professeur à la Faculté des Sciences, directeur de l'Institut de Physique, 50, rue Gauthier-de-Chatillon, à Lille (Nord). — Présenté par MM. Jouaust et Maurice Leblanc.

Gabriac (Marcel-Lucien), ingénieur I. E. G., élève à l'E. S. E., 9, avenue Pierre-Larousse, à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Hadges (Emile), ingénieur à la Direction des Travaux Publics de Tananarive (Madagascar). — Présenté par MM. Chaumat et Guilbert.

Hubert (Michel-Georges), ingénieur à la Société « Le Matériel Téléphonique », chef de chantier au département général de l'Entretien des centraux automatiques, 19, rue Dussourd, à Asnières (Seine). — Présenté par MM. Brugnon et Coussinet.

Huvelin (Paul), ingénieur, administrateur de l'Electrique Lille-Roubaix-Tourcoing, administrateur-délégué de l'Electro-Verre, administrateur de la Société Industrielle de gérance et d'exploitation, 51, boulevard Raspail, à Paris (6e). — Présenté par MM. Duval et Gourdeau.

Jolivald (Augustin), élève à l'E. S. E., 19, rue des Fossés-Saint-Jacques, à Paris (5e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Laborde (Jules), entrepreneur en constructions métalliques et électriques, 35, rue de la Préfecture, à Carcassonne (Aude). — Présenté par MM. Juppont et Camichel.

Laffargue (Marius), élève à l'E. S. E., 23, rue des Messageries, à Paris (10e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Larcher (Roger-Nicolas-Emile), élève à l'E. S. E., 16 avenue du Général-Mangin, à Paris (16e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Lepot (Georges-Jean-Armand), directeur commercial de la Société Indépendante de T. S. F., 66, route de Châtillon, à Malakoff (Seine). — Domicile : 32, rue Fontaine, à Paris (9e). — Présenté par MM. Ulrich et Chaumat.

Levites (Lev), ingénieur radioélectricien E. S. E., 72, rue Erlanger, à Paris (16e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert

Marie (Auguste-Jean-Jules), ingénieur I. E. T. et E. S. E., licencié ès-sciences, 3, rue des Chantiers, à Paris (5e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Mathias (Jean-Joseph), ingénieur I. E. G., directeur de l'agence du Sud-Ouest des Compteurs Garnier, 34, cours de Verdun, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. Ledieu et Lacharme.

Ménard (André), élève à l'E. S. E., 24, rue Villemomble, à Gagny (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Noize (Gabriel), administrateur-directeur de la Société Rigaud et Noize, 14, rue Lincoln, à Paris (8e). — Domicile : 74, boulevard Exelmans, à Paris (16e). — Présenté par M. Vatez et Gourdeau.

Parent (Jacques-Henri), élève à l'E. S. E., 106, avenue du Roule, à Neuilly-sur-Seine (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Rigaud (Jean), administrateur-directeur de la Société Rigaud et Noize, 14, rue Lincoln, à Paris (8e). — Domicile : 10, rue Clauzel, à Paris (9e). — Présenté par MM. Vatez et Gourdeau.

Tronchon (Adolphe), professeur à l'Ecole des Travaux Publics du bâtiment et de l'industrie, directeur des ateliers d'électromécanique de Cachan, A. Tronchon et Cie, 6, rue des Anciens-Combattants, à Cachan (Seine). — Présenté par MM. Chaumat et Vigneron.

Ybert (Paul-René-Léon) ingénieur I. T. N. élève à l'E. S. E., 40, rue Danicourt, à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Sans opposition de la part des Membres présents, ces candidats sont élus Membres titulaires de la Société.

M. Mathias, correspondant de l'Institut présente une série d'*observations nouvelles ou peu connues d'éclairs globulaires*(1).

Il expose les observations qui prouvent l'objectivité du phénomène de l'éclair globulaire. Il rappelle la fréquence de son déplacement horizontal à peu de distance au-dessus de la surface du sol; l'explosion par choc, laquelle peut se faire en plusieurs fois; les foudres habillées; la

(1) La communication de Mr Mathias et les observations qui l'ont suivies paraîtront dans un Bulletin ultérieur.

désélectrisation des foudres globulaires par contact avec un corps au potentiel zéro; les phénomènes qui dépendent de la tension superficielle de la matière fulminante et la sorte accidentelle de l'éclair globulaire de certains appareils électriques.

Les faits mis le plus souvent en évidence sont : la chute de la matière fulminante dans l'air, l'augmentation de son volume lorsqu'elle se décompose, l'absence de traces laissées par la matière fulminante; les phénomènes de caléfaction auxquels elle donne lieu ; la parfaite transparence de la matière fulminante pure ; sa fluorescence : la naissance des formes cylindrique et serpentine lorsque les impuretés de la matière fulminante deviennent massives ; et l'audition du tonnerre d'Arago après l'arrivée de la foudre globulaire.

A la suite de la communication de M. Mathias, MM. Bunet et Henriod présentent quelques observations (1).

M. le Président remercie vivement M. Mathias de son intéressant exposé portant sur des phénomènes mal étudié jusqu'ici.

La séance est levée à 23 heures.

LES PERFECTIONNEMENTS DU MATÉRIEL ÉLECTRO-RADIOLOGIQUE A L'EXPOSITION DU III[e] CONGRÈS INTERNATIONAL DE RADIOLOGIE (1)

Par M. Hector Pilon

Commissaire général de l'Exposition,

L'auteur résume les importants perfectionnements qui ont été réalisés dans la construction de l'appareillage radiologique présenté à l'Exposition du III[e] Congrès International de Radiologie de Juillet 1931.

On y voit la part importante prise par le tube à vide dans ce domaine de l'électrotechnique, où il a permis des solutions entièrement nouvelles.

Les perfectionnements très considérables réalisés dans la construction des ampoules à vide, qui furent d'abord si délicates, ouvrent de nouvelles perspectives à de nombreuses applications industrielles du tube à vide ou à atmosphère gazeuse.

Nous avons assisté aux progrès formidables de la T. S. F. grâce aux tubes à décharge électronique. Une évolution similaire s'est produite dans l'industrie radiologique dès l'apparition du tube Coolidge et des soupapes « Kénotron » et, depuis quelque temps, de tels progrès se sont réalisés dans cette branche de l'électrotechnique qu'il est intéressant de les résumer ici, car ces solutions permettent d'envisager, dans un avenir très prochain, de nombreuses applications du tube à vide à la construction électrique industrielle.

C'est pourquoi nous ferons ici un rapide exposé de ce qui a été présenté à l'exposition du III[e] Congrès-International de Radiologie, qui s'est tenue à Paris en juillet dernier.

Cette exposition eut lieu au Palais des Congrès, à la porte de Versailles ; elle accompagna le Congrès International de Radiologie, très importante manifestation scientifique qui se tient, tous les trois ans, dans une capitale différente.

Décrire toutes les solutions ingénieuses qu'on pouvait admirer à cette exposition dépasserait le cadre de cette communication, nous nous contenterons donc de passer en revue les seules réalisations ou

(1) Communication présentée à la Société Française des Electriciens le 6 février 1932, lors de la séance commune avec la Société des Ingénieurs civils de France.

inventions nouvelles, qui non seulement, feront voir la valeur technique des solutions, mais montreront aussi la place importante tenue dans ce palmarès par l'industrie française.

Les progrès que nous allons signaler ont porté sur :

1° La protection contre les rayons X et les chocs électriques.

2° L'augmentation de puissance et l'automaticité des générateurs.

3° L'obtention de très hautes tensions pour la radiothérapie.

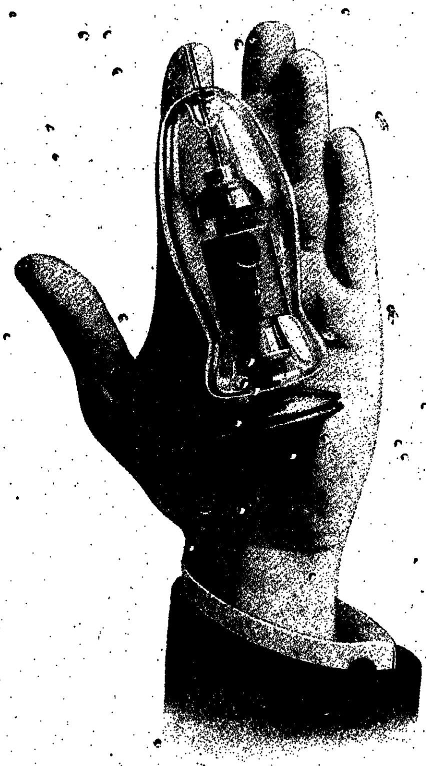


Fig. 1. — Ampoule protégée fonctionnant dans l'huile.

4° L'évolution nouvelle des appareils d'électrothérapie ou d'électrodiagnostic.

1° *Protection contre le rayonnement X et les chocs électriques.*

C'est dans cette voie, capitale pour les opérateurs et les malades, que les efforts les plus importants ont été tentés et l'on comprendra l'intérêt de ces solutions si l'on songe que, chaque jour, les appareils de diagnostic deviennent plus puissants et que la radiothérapie réclame des tensions toujours plus élevées.

Pour la protection en diagnostic, trois solutions ont dominé :

A) La première de celles-ci consiste à réunir, dans une même cuve remplie d'huile, le transformateur et l'ampoule à rayons X. Cette

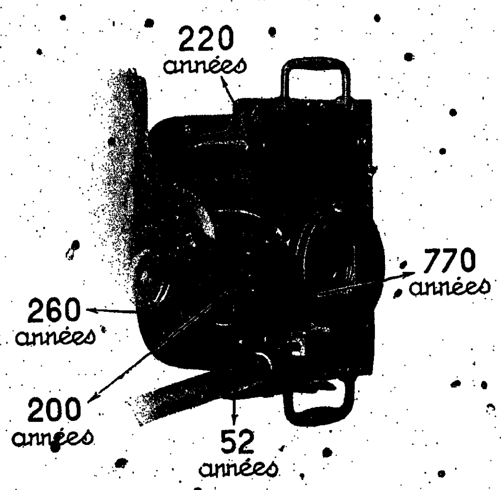


Fig. 2. — Cuve protectrice, contenant le générateur et l'ampoule à rayons X les années indiquent le temps qu'il faudrait rester exposé aux endroits indiqués pour ressentir les premiers symptômes de radiodermite.

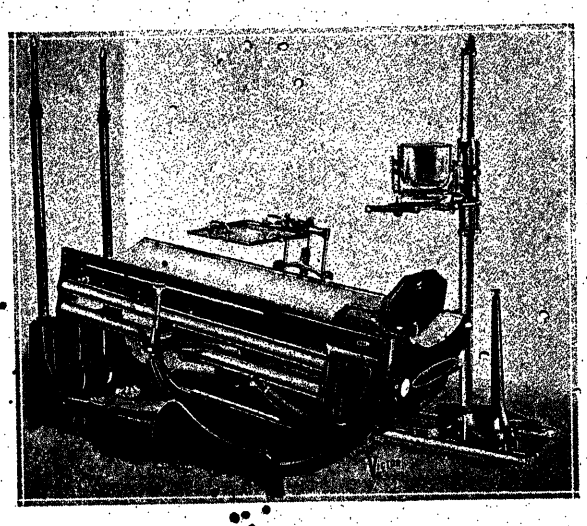


Fig. 3. — Table oscillante, utilisant un générateur protégé dit « skock proof ».

réalisation a présenté de sérieuses difficultés, dont j'énumérerai les principales :

— réaliser un transformateur léger et de faible encombrement, élevant la tension à 80 000 V pour une intensité de 30 mA ;

— construire une ampoule excessivement petite et auto-protectrice (la figure 1 en montre les dimensions) ;

— assurer l'isolement et le refroidissement par une huile convenable et prévoir son expansion.

La figure 2 représente la réalisation d'une de ces cuves.

Des mesures faites à l'électromètre autour de ce dispositif pendant le fonctionnement, ont permis de connaître le nombre d'années nécessaires pour ressentir des premiers symptômes de radiodermite, après une présence près de l'appareil de 8 heures par jour et de

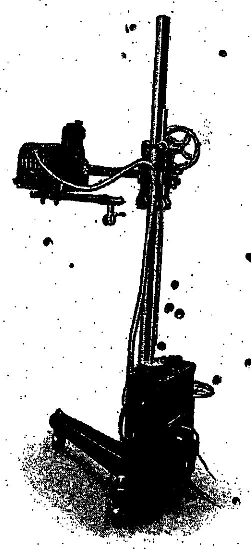


Fig. 4. — Appareil transportable « sécurité ».

300 jours par an. Ces données, portées sur la figure 2, se passent de tout commentaire.

Cette cuve complète, c'est-à-dire garnie d'huile et contenant générateur et ampoule, ne pèse que 32 kg dans le cas de la réalisation française qui est d'encombrement moindre que la réalisation américaine, dont le poids est de 80 kg. La GENERAL X-RAY CORPORATION, de Chicago, qui créa ce type d'appareil, qu'elle appela « Shock-Proof », l'a fixé à une table d'examen radiologique mue par moteur électrique, comme le montre la figure 3.

Le dispositif construit par la COMPAGNIE GÉNÉRALE DE RADIOLOGIE, sous le nom de « Radiogénérateur Sécurité », peut être supporté simplement par un pied, facilement orientable, et constituer ainsi un appareil transportable (figure 4), soit faire partie d'une table d'examen

comme le représente la figure 5 et servir au radio-diagnostic en toute position, soit encore par exemple faire corps avec une table de chirur-

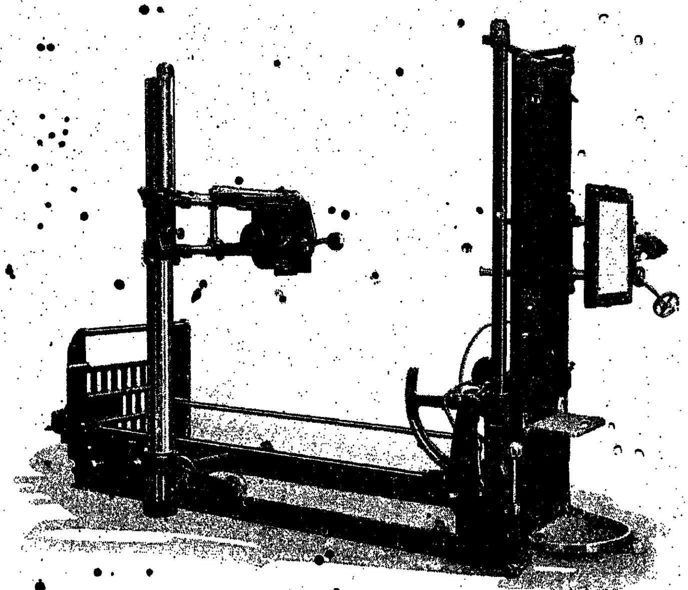


Fig. 5. — Table oscillante utilisant un générateur « Sécurité ».

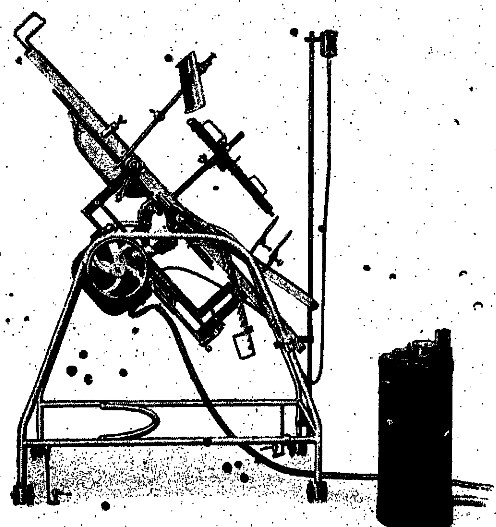


Fig. 6. — Table de chirurgie utilisant un générateur « Sécurité ».

gie (figure 6), où, grâce à ses qualités d'étanchéité, il peut rester à demeure sans craindre les projections de liquide.

B) La seconde solution consiste à entourer l'ampoule d'une gaine

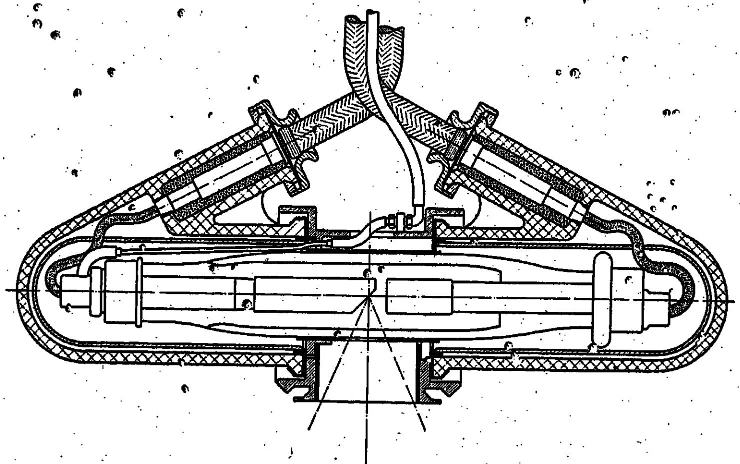


Fig. 7. — Ampoule à rayons X dans une gaine protectrice.

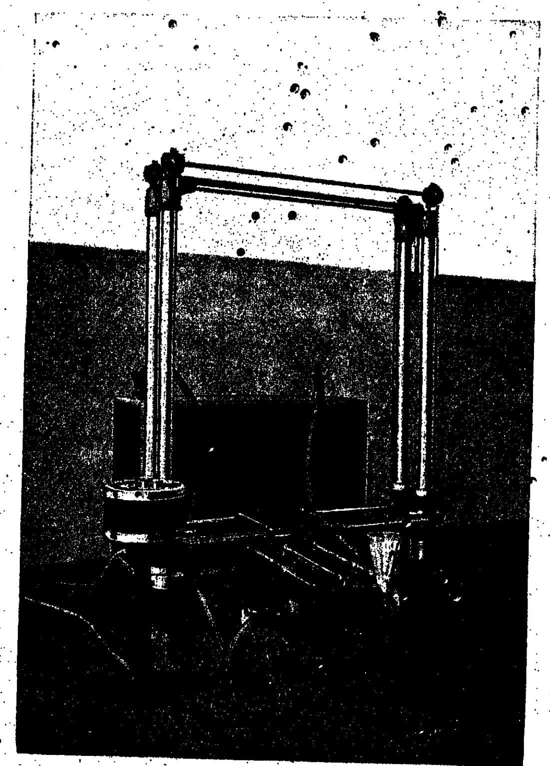


Fig. 8. — Dispositif Philips-Müller d'un tube de radiothérapie avec gaine protectrice.

protectrice, à laquelle aboutissent des câbles isolants, disposés de telle

sorte qu'aucun point porté à la haute tension soit accessible. L'ampoule, ainsi gainée, prend, sur le pied-support, la place de l'ancienne ampoule.

Deux applications de ce principe ont été faites : l'une réalisée en Allemagne par SIEMENS-REINIGER-VEIFA, qu'au cours de ces lignes nous désignerons maintenant par les lettres S. R. V., et l'autre par la firme PHILIPS-MULLER.

La figure 7 représente le dispositif S. R. V. qui est une gaine protectrice entourant l'ampoule à rayons X auto-protectrice, des câbles à haute tension isolants amènent le courant à l'ampoule, tandis qu'un

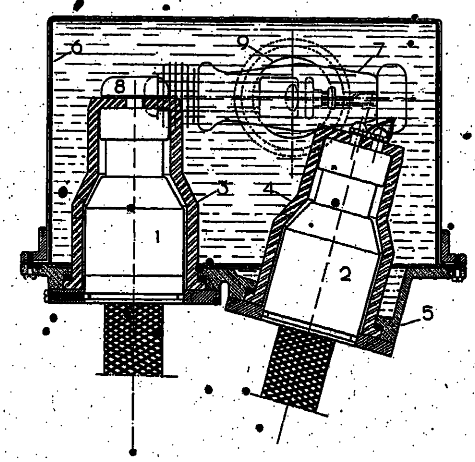


Fig. 9. — Coffret contenant une ampoule fonctionnant dans l'huile.

tuyau conduit le fluide servant au refroidissement de l'anticathode du tube à rayons X de thérapie ou de diagnostic.

PHILIPS-MULLER a construit un dispositif analogue, avec refroidissement par soufflerie d'air, pour ampoules de diagnostic ou thérapie (figure 8).

L'autre réalisation, faite en France par la COMPAGNIE GÉNÉRALE DE RADIOLOGIE, que nous désignerons par lettres C. G. R., dérive de la cuve à huile réalisée pour la thérapie depuis déjà plusieurs années. Le dispositif nouveau consiste en une petite boîte métallique contenant une huile isolante et refroidissant une ampoule du type représenté figure 1. A cette boîte aboutissent les câbles à grand isolement similaires à ceux décrits ci-dessus.

On voit, figure 9, l'exécution de ce dispositif, qui reste d'un encombrement très réduit. Dans la figure, 7 est l'ampoule, 6 la cuve ayant un orifice 9 d'où sort le faisceau de rayons X, 1 et 2 sont les

câbles isolants, 3 et 4 les raccords dans lesquels viennent se fixer les câbles haute tension, ainsi aisément détachables, maintenus sur un couvercle 5.

Une des principales difficultés de ces réalisations fut la fabrication de câbles à grand isolement suffisamment souples pour suivre l'ampoule dans ses divers déplacements ; il y eut aussi à créer des ampoules spéciales, de dimensions réduites, mais néanmoins très puissantes, car ces dispositifs sont prévus pour fonctionner à régime élevé (100 *m*A et plus pour 100 kV).

Par ce dernier moyen, médecin et malade ont une excellente pro-

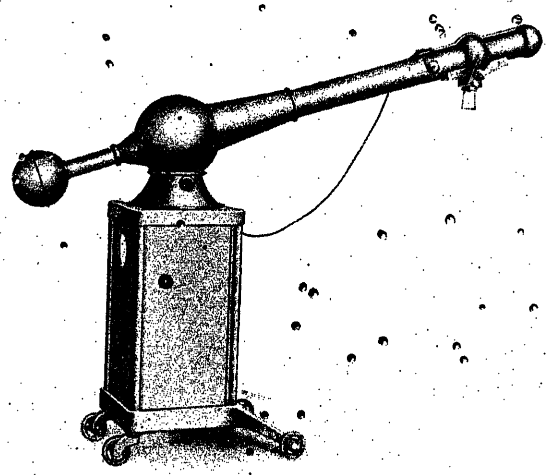


Fig. 10. — Générateur protégé pour radiothérapie superficielle.

tection, aussi bien contre les chocs électriques que contre les radiations X, puisque le faisceau ne sort que par la fenêtre spécialement réservée à cet effet. Cette conception d'ampoule protégée a l'avantage de s'appliquer aux générateurs existants.

C) La troisième solution consiste à enfermer l'ampoule et le générateur dans une même enceinte, celle-ci ne servant qu'à la protection contre les chocs électriques.

S. R. V. présentait ainsi un générateur pour la radiothérapie superficielle, surmonté d'un long cylindre orientable contenant les conducteurs haute tension et se terminant par un renflement formant enceinte et renfermant un tube à rayons X auto-protecteur spécial (figure 10).

Koch et Sterzel exposaient un dispositif spécial, cette fois pour la radiothérapie profonde, constitué par une vaste boîte métallique en

forme d'U, fixée au plafond de la pièce. Dans chacune des branches de l'U se trouvent les éléments du générateur haute tension et, dans la partie horizontale, est logée l'ampoule à rayons X. Une fenêtre orientable est ménagée dans cette dernière partie pour diriger le faisceau dans la direction voulue. Ainsi se trouve assurée la protection contre le rayonnement X et la haute tension.

Enfin, dans ce même ordre d'idée, PHILIPS présentait un générateur pour la radioscopie et la radiographie verticales à grande puissance. soit une sorte d'armoire contenant tous les éléments, générateur et ampoules pour radioscopie et radiographie. Les parois du meuble servent de protection contre la haute tension; les ampoules, auto-protectrices, devant assurer la protection contre le rayonnement X.

Tous ces appareils assurent, d'une façon tout à fait satisfaisante, la protection contre le rayonnement X direct et l'on peut dire qu'ils marquent, de ce côté, un progrès considérable sur les dispositifs présentés au Congrès précédent.

Pour compléter cette protection contre le rayonnement X, le radiologiste dispose en outre de paravents protecteurs entourant le malade et arrêtant le rayonnement diffusé par son corps; ces dispositifs sont déjà entrés dans la pratique depuis plusieurs années.

Nous avons, en France, des réalisations parfaitement adaptées comme celle préconisée par le Dr BELOT. Il est juste néanmoins de signaler un dispositif un peu spécial, réalisé par un inventeur autrichien, le Dr RATKOCZI. Cet appareil se distingue par les diverses articulations permettant le déplacement de la face avant du paravent portant l'écran fluorescent sous tous les angles nécessaires à l'examen radioscopique, tandis que les panneaux latéraux articulés assurent l'obturation complète. La mobilisation de l'ampoule se faisant, par enclanchement, sur des courroies toujours en mouvement verticalement et horizontalement, on évite de cette manière toute inertie de mise en route. Il s'agit là d'un principe adopté pour la première fois en radiologie.

Et, pour résumer ce chapitre, nous voyons que si ces dispositifs ont pu être réalisés, c'est grâce aux perfectionnements considérables des ampoules à rayons X ; les unes minuscules et fonctionnant dans l'huile sous des tensions de 85 et 120 kV ; d'autres, de dimensions plus grandes, mais établies pour fonctionner dans des gaines protectrices, solutions merveilleuses quand on envisage tous les problèmes constructifs de telles ampoules.

2° *Augmentation de puissance et automaticité des générateurs :*

Les nécessités du radiodiagnostic obligent de plus en plus à la prise excessivement rapide des images. On gagne en netteté, puisqu'on évite les mouvements relatifs du malade et l'on peut ainsi saisir, d'une façon nette, la silhouette des organes en mouvement.

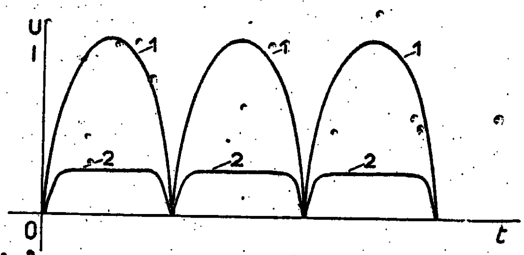


Fig. 11.

Il ne suffit pas cependant d'augmenter la puissance des générateurs ordinairement alimentés par du courant monophasé 50 p:s car l'ampoule à rayons X est soumise à une tension sinusoïdale redressée, représentée par une courbe, dont l'allure est dessinée en 1 figure 11, l'intensité approximative dans l'ampoule étant 2.

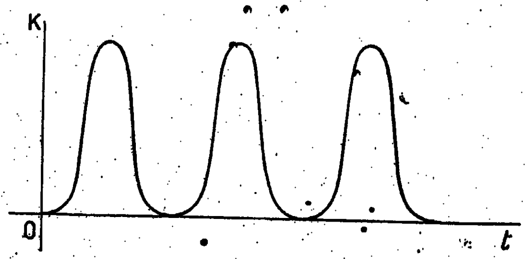


Fig. 12.

La sensibilité des films radiographiques et des écrans renforçateurs étant beaucoup plus grande pour les tensions élevées que pour les faibles tensions, il en résulte que l'impression photographique n'est importante que lorsque la tension est voisine du maximum, c'est-à-dire pendant une fraction relativement petite de chaque demi-période. On en déduit que, si l'on veut obtenir des temps de pose excessivement rapides avec un générateur monophasé, l'impression photographique ne se produit guère que pendant un tiers du temps de pose (figure 12) et, d'autre part, deux radiographies faites avec un même temps de pose peuvent différer l'une de l'autre, si elles ne sont pas prises au même moment de l'alternance.

Au contraire, si l'on utilise un courant triphasé, dont chaque phase est redressée par deux Kénotrons, on obtient une courbe qui peut être considérée comme constante (figure 13), puisque la variation est inférieure à 7 pour cent de sa valeur moyenne ; elle permet donc d'atteindre les temps de pose les plus courts avec régularité.

Ces avantages ont ainsi poussé les constructeurs à réaliser des générateurs puissants, alimentés par du courant triphasé, utilisant 6 Kénotrons pour redresser les 3 phases. De semblables générateurs, présentés par la plupart des constructeurs, étaient munis de déclencheurs très rapides.

En effet, pour prendre, dans tous les cas, des images nettes des contours du cœur, il est indispensable d'obtenir des temps de pose

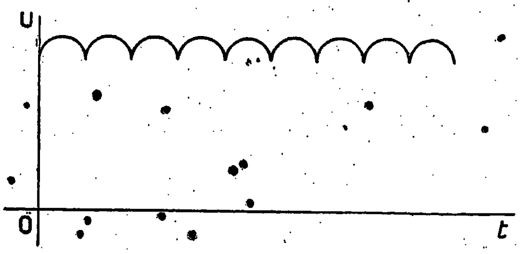


Fig. 13.

d'une grande rapidité. Si l'on admettait que le mouvement du cœur fût parfaitement sinusoïdal, le déplacement de son profil serait de l'ordre de 4 à 5 cm par seconde, mais les mouvements du cœur sont loin d'être sinusoïdaux et si, dans une certaine partie de la période, son mouvement est lent, dans l'autre partie son mouvement est très rapide et correspond alors à des vitesses très supérieures à 5 cm par seconde.

On voit donc que, même si on admet un flou de l'ordre de 1 mm pour le bord du cœur, il faut employer des poses inférieures à 1/1000^e de seconde pour être assuré de la netteté de l'image, non seulement dans la partie lente du mouvement, mais aussi dans la partie rapide.

Parmi ces déclencheurs, on remarquait une solution nouvelle ; le déclencheur statique de la C. G. R., qui permet de mesurer la quantité d'électricité d'une façon parfaitement régulière, quelle que soit la rapidité du temps de pose, qui peut descendre, avec ce type de compteur, jusqu'à 6/1000^e de seconde.

Ce dispositif est composé d'un condensateur, dont on peut faire varier la capacité et qui se trouve traversé par le courant même du tube à rayons X. Pendant le fonctionnement du tube, le condensa-

teur se charge d'une quantité d'électricité fonction de la capacité choisie, qui est elle-même celle qui a traversé le tube à rayons X. Aux bornes de ce condensateur est un éclateur, dont la tension disruptive reste constante. Dans ces conditions, dès que la charge du condensateur a élevé le potentiel à sa valeur disruptive, une décharge se produit, actionnant un très petit électro-aimant monté en série avec le condensateur. Celui-ci opère instantanément la coupure du primaire. Son fonctionnement est extrêmement rapide, car l'énergie emmagasinée dans le condensateur est dépensée sous une puissance considérable. Le réglage de ce condensateur se fait par des touches portant les chiffres de quantité, comme dans une machine à additionner.

Philips-Muller présentait une autre réalisation de générateur puissant, destiné à la radiologie thoracique verticale. Nous avons parlé de ce générateur au point de vue de la protection contre les chocs électriques. Il s'agissait d'un meuble servant d'appui au malade et contenant le générateur de haute tension, ainsi que deux ampoules. L'une, servant à la radioscopie, est alimentée sans dispositif spécial, l'autre, à anticathode tournante, étant alimentée par la décharge d'un condensateur. C'est un principe qui fut réalisé jadis et qui est repris ici sous une forme moderne pour la construction d'un générateur relativement puissant avec une faible consommation primaire.

En effet, un petit transformateur charge lentement un condensateur qui se décharge brusquement dans l'ampoule, mais, toutefois, avec l'adjonction d'une self importante dans le circuit de décharge, celle-ci ayant pour but de modifier la forme de la courbe de décharge, en vue du fonctionnement convenable.

3° *Obtention de très hautes tensions pour la radiothérapie et pour les applications scientifiques et industrielles.*

Il semble nécessaire, pour la radiothérapie profonde, et il est indispensable, pour les applications scientifiques ou industrielles, d'obtenir des tensions toujours plus élevées pour avoir un rayonnement X de très courte longueur d'onde, c'est-à-dire très pénétrant. Des recherches sont constamment faites dans cette voie pour la radiothérapie profonde et les dernières expériences réalisées pour des applications industrielles ont montré la nécessité de dépasser les tensions de 200 ou 250 kV actuellement appliquées.

S. R. V. présentait un générateur à 450 kV en courant continu, ainsi qu'une ampoule fonctionnant sous cette tension.

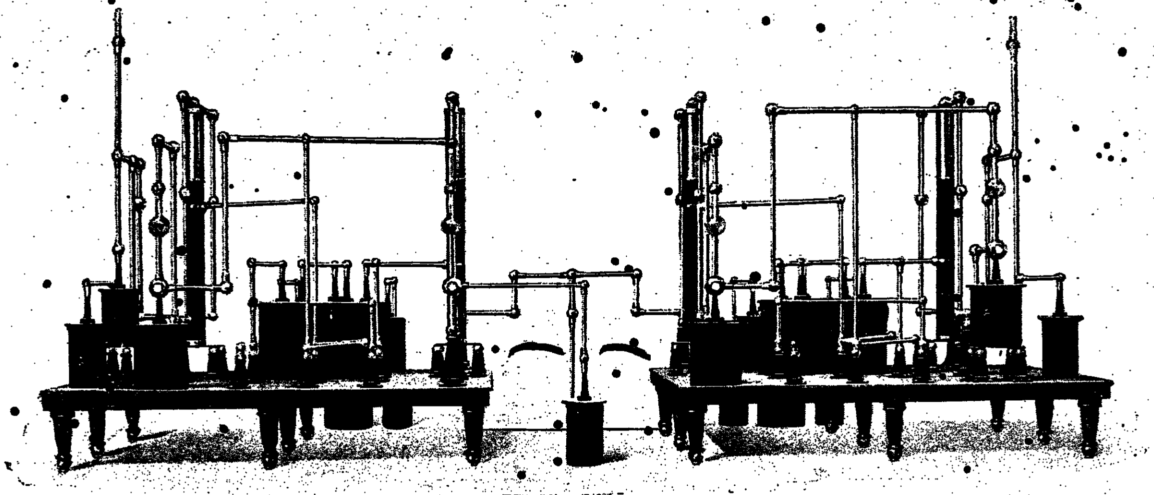


Fig. 14. — Générateur à haute tension 700 kV.

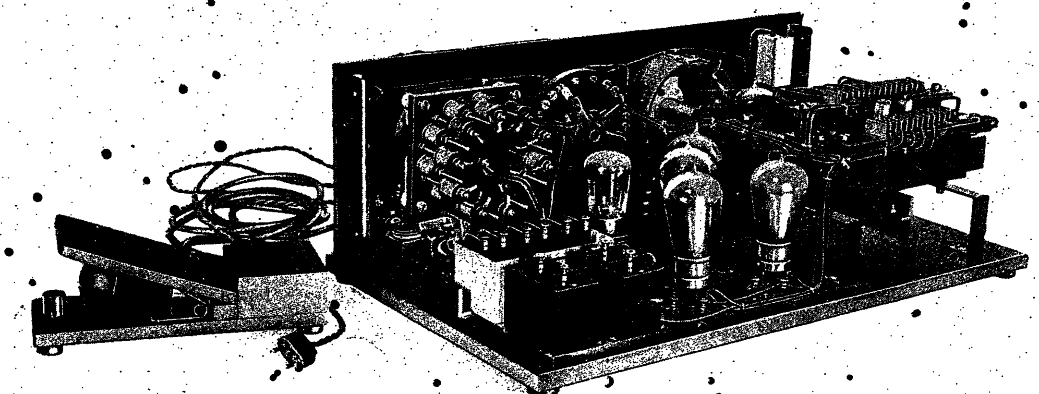


Fig. 16. — Appareil d'électrodiagnostic.

C. G. R. avait exposé un générateur pouvant alimenter, en courant continu sous 400 kV, une ampoule à rayons X spéciale et ce même générateur, par une modification immédiate et simple de couplage, pouvait fournir du courant pulsatoire sous une tension de 700 kV (figure 14).

Ces générateurs utilisent un montage bien connu, inventé par M. Marius Latour et qui permet de doubler la tension d'un transformateur au moyen de condensateurs. Là encore, les tubes à vide ont permis de réaliser ces générateurs à très haute tension ; des Kénotrons, branchés sur chaque onde du transformateur, chargent néga-

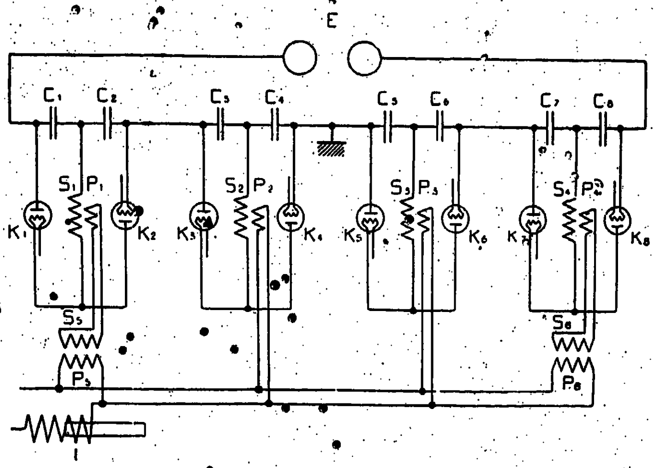


Fig. 15. — Générateur à tension constante montage « Latour ».

tivement et positivement deux condensateurs, aux bornes desquelles on recueille une tension ainsi doublée. On peut ainsi placer côte à côte plusieurs étages pour obtenir une tension de plus en plus élevée. (figure 15).

Le générateur S. R. V. est à un étage pour obtenir la tension de 450 kV ; celui de C. G. R. est à deux étages en vue d'obtenir, par un autre couplage, une tension pulsatoire de 700 kV.

J'ai cité ces types de générateurs, bien que leur principe ne soit pas nouveau, puisqu'un semblable appareil de la C. G. R. fonctionne, depuis un an, sous 500 kV au Laboratoire de Chimie Physique de M. le Professeur J. Perrin à la Faculté des Sciences de Paris.

Toutefois, les formes réalisées maintenant, grâce à de nombreux perfectionnements aux condensateurs, aux Kénotrons, aux ampoules, en font des appareils, non plus de laboratoire, mais d'utilisation courante, tant pour la radiothérapie que pour des usages industriels, tels que radiométallographie.

Là encore tous ces résultats ont pu être obtenus grâce aux perfectionnements considérables réalisés dans les tubes à vide : ampoules à rayons X fonctionnant sous 400 kV en courant continu, Kénotrons redressant 350 kV.

4° *Perfectionnements aux appareils d'électrothérapie et d'électro-diagnostic :*

Depuis quelques années déjà, des appareils à haute fréquence, tels que ceux destinés aux traitements de diathermie ont vu leur fabrica

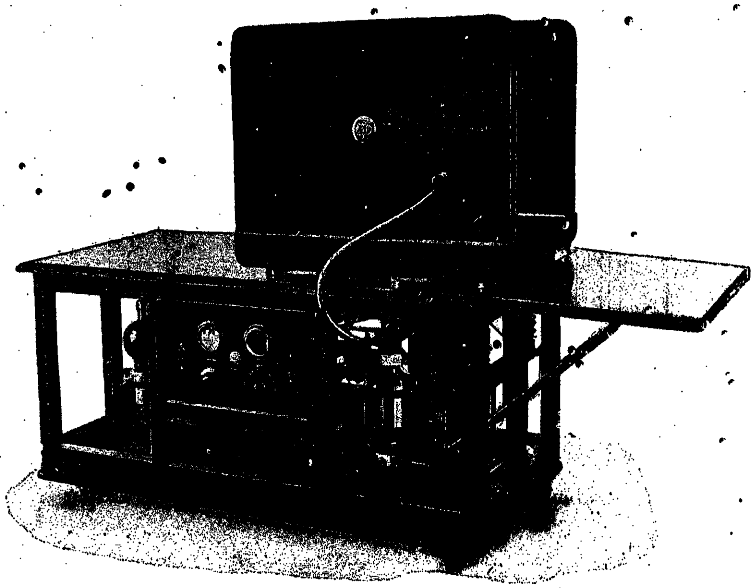


Fig. 17. — Appareil pour traitement diathermique en profondeur à distance.

tion profiter des perfectionnements appliqués à la T. S. F., grâce aux lampes à trois électrodes.

A l'exposition de Juillet 1931, l'évolution fut marquée, d'une façon très nette, aussi bien en électrothérapie, où la lampe à trois électrodes a supplanté tous autres dispositifs générateur ou modulateur de courant, qu'en électro-diagnostic.

C. G. R. présentait de petits générateurs alimentés directement par le secteur, au moyen de tubes à vide et de condensateurs. Ces montages ont permis d'obtenir des courants galvaniques permanents, rythmés, inversés et ondulés, faradiques et galvano-faradiques.

En électro-diagnostic, un appareil BRILLOUIN-ZIMMERN, pour la mesure de la chronaxie, est également basé sur l'emploi des tubes à vide. (fig. 16).

Enfin, dans cette catégorie, se remarquaient plusieurs appareils pour traitements diathermiques en profondeur et à distance, par générateur à ondes courtes, le malade se trouvant placé entre les deux éléments d'un condensateur.

C. G. R. présentait un modèle pour applications généralisées ou localisées, d'une puissance de 1 kW avec 25 m de longueur d'onde (fig. 17).

S. R. V. présentait un type, pour applications localisées, de 4 à 8 m de longueur d'onde, à faible puissance.

Walter avait exposé un petit générateur de ce type.

Ces appareils, d'une conception toute nouvelle, sont encore à une période expérimentale pour les applications diathermiques, mais les résultats intéressants, obtenus dans diverses affections, font prévoir pour l'avenir, des applications insoupçonnées. Dans ce cas encore, le tube à vide a permis de franchir un pas nouveau vers le progrès.

Enfin, M. Dauvillier présentait un appareil pour la transmission à distance des images invisibles et leur transformation en images visibles. Cet appareil, qui est à sa période de mise au point, est constitué d'un dispositif de télévision adapté à cette fin.

Un disque de Niepkow, opaque aux rayons X, à l'exception naturellement des trous réservés, permet de balayer le corps à examiner par un mince faisceau de rayons X. Celui-ci, après l'absorption inhérente aux parties qu'il a traversées, vient ioniser une chambre contenant de l'argon; le courant ainsi obtenu module un système d'éclairage qu'un autre disque de Niepkow, en synchrone du premier, transforme en image visible susceptible par exemple d'être enregistrée sur la bande photographique d'un appareil de cinéma.

On peut ainsi espérer que les progrès de la télévision permettront prochainement à ce très intéressant appareil d'entrer dans la pratique et d'apporter des éléments nouveaux au radiodiagnostic.

Voici, rapidement énumérés, les progrès importants que le Congrès de Paris a mis en valeur.

L'avance est considérable et l'on peut dire que la majorité des solutions réalisées sont dues aux perfectionnements des tubes à vide : ampoules à rayons X spéciales, redresseurs à haute tension, lampes à trois électrodes ou tubes à gaz rare sont à la base de tout ce que nous avons énuméré.

Et il n'y a pas de doute que nombreuses de ces solutions, mises ici en pratique, n'ouvrent la voie à des applications similaires dans le domaine industriel.

LE FOUR MIGUET (1)

par Serge Heuland

Ingénieur Electro-Métallurgiste.

Laissant de côté l'étude de la partie purement électrique du Four Miguet, qui a déjà fait l'objet d'une importante communication de M. Bergeon (2), le présent exposé comprend 4 parties :

1° *Détails de construction.*
2° *Conduite d'un four Miguet.*
3° *Avantages spéciaux du four.*
4° *Résultats obtenus.*

PREMIERE PARTIE

Détails de construction

Le four Miguet, qui a fait son apparition dans le domaine de l'électro-métallurgie en 1927, est le résultat de très nombreuses années de recherches de la part de M. Miguet, Directeur Général de la Société Electrométallurgique de Montricher et ensuite de la collaboration de M. Miguet avec M. Perron, directeur de cette Société.

Le four est du type monophasé à une seule électrode, c'est-à-dire à sole conductrice.

L'électrode

L'électrode Miguet est une électrode continue, c'est-à-dire qu'elle est allongée à sa partie supérieure au fur et à mesure de son usure à sa partie inférieure.

Voici le détail de sa construction :

1° *Partie mécanique :* Elle est constituée par des couronnes circulaires en fer carré d'environ 30 à 35 mm de côté. Ces couronnes sont disposées horizontalement et servent de supports et d'entretoises à des fers I de 130 mm en nombre égal à celui des secteurs de carbone qui constitueront la partie vitale de l'électrode elle-même (fig. 1).

(1) Communication présentée à la séance du 13 février 1932 de la 3e Section de la Société française de Electriciens, sous la présidence de M. Jumau.
(2) *Bulletin de la Société française des Electriciens*, n° 53, 4e série, tome VI.

2° *Secteurs :* Ceux-ci sont en carbone amorphe de même qualité et de même fabrication que les anciens charbons que l'on utilisait sur nos vieux fours. Leur forme, que je rappelle par la figure 2, est de section trapézoïdale avec la grande base arrondie pour que l'ensemble ait exactement, après montage, une forme cylindrique.

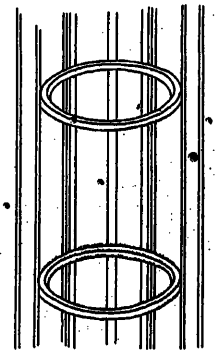


Fig. 1.

L'usinage de ces électrodes est des plus précis.

Quelques chiffres feront voir plus clairement cette précision :

Pour les demi-queues d'aronde d'extrémité et en tous sens : ± 1/2 mm.

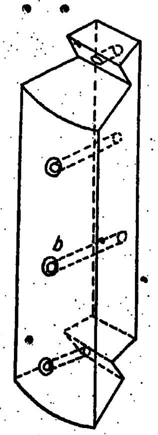


Fig. 2.

Pour l'épaisseur entre faces d'appui et de contact ± 1 mm.

Pour l'épaisseur entre flancs de juxtaposition ± 2 mm.

Pour la longueur totale ± 2 mm.

Il est évident que cet usinage tout à fait spécial nécessite un outillage spécial à outils multiples pour en augmenter le débit :

Pour le taillage des demi-queues d'aronde et la coupe de longueur, il faut une machine à sciage multiple, de 6 lames, qui livre, avec une précision rigoureuse, un secteur tous les quarts d'heure.

Pour le dressage des faces d'appui et de contact, il faut des raboteuses assez robutes et rapides pour permettre un moletagé fin en deux passes au pas de deux millimètres ; la raboteuse de Montricher, qui admet 4 secteurs sur sa table de chariotages, assure une face de contact et une face d'appui toutes les heures et demie.

Pour le dressage des faces de juxtaposition, il faut des raboteuses semblables aux précédentes, c'est-à-dire susceptibles de permettre un moletage relativement grossier en une seule passe au pas de 6 mm ; la raboteuse de Montricher assure 4 flancs de juxtaposition toutes les heures et demie.

Perçage des secteurs : Il faut des trous percés à 30 mm à l'aide de fleurets à percussion, tels que ceux utilisés pour les carrières de calcaire dur.

Il faut également des logements d'écrous, obtenus à l'aide de fraises à percussion munies d'un téton de 25 mm.

Tolérance d'axe en axe : Cette tolérance pour des trous de 30 mm destinés à recevoir des tiges filetées de 20 mm n'est que de 2 mm.

On l'observe sans difficulté par un traçage simultané sur les deux faces d'appui et de contact, avec perçage consécutif en deux moitiés à la rencontre l'un de l'autre et raccordement ultérieur par équarissoire.

Dilatation transversale : La dilatation transversale de l'armature n'est pas susceptible d'influencer la bonne tenue des secteurs.

Elle n'a pour conséquence qu'un accroissement de l'intervalle entre secteurs, lequel accroissement est d'ailleurs compensé par un gonflement simultané, en cours de cuisson, de la pâte au sucre qui sert de trait d'union entre deux secteurs consécutifs.

Dilatation verticale : La dilatation verticale de l'armature, qui serait plus dangereuse, se trouve rendue inopérante par la fusion du fer dès la sortie des plaques de contact refroidies. Elle est d'ailleurs compensée, en grande partie, par le jeu des éclissages qui existent tous les mètres et demi.

Pour amoindrir encore son influence, des essais ont été menés à bien pour la suppression du boulonnage des demi-queues d'arondes.

Cette suppression a eu pour effet de permettre le glissement des

demi-queues d'aronde les unes sur les autres, qui est compensé, comme pour les intervalles entre les secteurs, par un gonflement simultané de la pâte au sucre en cours de cuisson.

Intervalles entre secteurs : Les anciens intervalles de 15 mm, qui donnaient toute satisfaction pour les fabrications de carbure de calcium et de ferro-silicium, ont été ramenés à 6 mm dans le cas du manganèse, pour supprimer les cheminées consécutives à l'influence chimique des fumées MnO sur la pâte au sucre.

En fait, des intervalles de 10mm seulement donnent pleine satisfaction, alors que ceux de 15 mm sont déjà défectueux et que ceux de 25 mm compromettent la bonne tenue des électrodes.

Montage des secteurs : Avant de poser un secteur dans l'ensemble de l'électrode, il est nécessaire de procéder à un brochage des faces de juxtaposition afin de fournir une surface d'accrochage effectif à la pâte au sucre qui servira de liaison entre deux secteurs consécutifs.

Au moment de la première construction de l'électrode, on utilise des secteurs dits « de départ » et de longueurs différentes, afin de ne pas avoir la totalité des secteurs à rallonger en cours de fonctionnement du four.

Ces secteurs de départ ne comportent évidemment pas de queues d'aronde à leur partie inférieure.

Chaque secteur est posé, suivant son axe longitudinal, contre un des fers à I repérés (*a*) dans la figure 1. Une bande de carton d'amiante l'isole électriquement de ce fer.

Des tiges filetées, passant des les trous *b* (fig. 2) des secteurs, assurent la fixation mécanique des secteurs.

Ces tiges filetées et leurs écrous sont également isolés. Ces divers isolements ont pour but d'éviter le passage direct du courant dans l'armature métallique ; passage qui pourrait avoir comme conséquence une fusion instantanée de la charpente métallique.

C'est toujours pour la même raison que l'écrou de serrage (fig. 3) est noyé dans un agglomérat de poudre d'amiante et de silicate de soude.

Lorsque la totalité des secteurs est en place, il existe évidemment un jeu entre chaque secteur, qu'il faut combler pour éviter ce que nous appelons des soufflards, c'est-à-dire des flammes d'autant plus puissantes que ces intervalles forment de véritables cheminées de tirage.

Ces jeux sont comblés de la façon suivante : ils sont obturés, côté

intérieur de l'électrode, au moyen d'une pâte au sucre épaisse posée à la truelle, et, côté extérieur au moyen d'une poudre d'amiante silicatée. Dans l'intervalle, on coule une pâte de composition :

4 kg de poudre d'électrode (tamis 200).

3 kg de sirop de sucre (3 kg de sucre dans 5 litres d'eau).

Indépendamment de cette pâte, entre les secteurs de départ, c'est-à-dire dans une électrode neuve non cuite, on dispose des cales de bois destinées à brûler à bref délai afin de constituer des trous d'échappement à usage des gaz de distillation du noyau central.

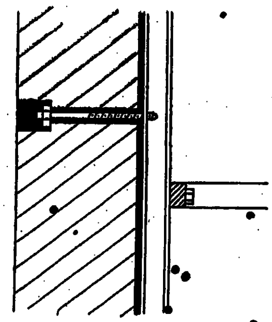


Fig. 3.

Confection du noyau central. — Lorsque les secteurs sont en place il reste, au centre de l'électrode, une cheminée assez importante qu'il est nécessaire de combler.

On le fait en utilisant une pâte semblable à tous les pisés employés en électro-métallurgie, soit pour des confections de soles, soit pour des garnissages d'électrodes ordinaires ou du type Söderberg.

Ce garnissage a besoin, après cuisson (cette cuisson se faisant par utilisation de la chaleur du four lui-même), de présenter une certaine résistance à l'écrasement, et une contraction négligeable.

En effet, le rôle mécanique de l'armature interne, déjà très aléatoire par ramollissement dès la moitié inférieure des plaques de contact, cesse complètement par fusion au sortir même de ces plaques. En dessous des plaques, les secteurs ne peuvent donc plus être maintenus, extérieurement, que par les demi-queues d'aronde des secteurs supérieurs et, intérieurement, que par le noyau cuit sur place. Si ce noyau tombe par manque de soudure entre pilonnages sucessifs ou se contracte, soit par mauvaise granulation de la chamotte, soit par mauvaise qualité de l'agglomérant, l'écartement diamétral entre secteurs cesse d'être invariablement assuré et la pesanteur fait glisser les

demi-queues d'aronde les unes sur les autres en en déterminant l'ouverture des joints horizontaux.

L'air pénètre alors dans ces joints et brûle les demi-queues d'aronde petit à petit, jusqu'à l'inévitable chute des secteurs en cause.

Il faut donc un noyau compact et résistant, sans contraction diamétrale, ni solution de continuité, c'est-à-dire tel qu'il est obtenu normalement avec le mélange suivant :

Brai gras fluide à 40° C et contenant de 23 à 25 pour cent de carbone cokéfiable	25
Crasse de cornues en poudre au tamis de 200 mailles au pouce français et obtenue par classement au sélecteur	25
Coke à 10 pour cent de cendres et moins de 1 pour cent d'eau en grains de 0 à 6 directs du broyeur à marteaux............	50
	100

Ce mélange, correctement malaxé dans un appareil sous vapeur à 6 kg, est ensuite pilonné vers 80° C à raison de 75 cm de hauteur par séance de pilonnage.

Une précaution essentielle consiste à n'effectuer un nouveau pilonnage que lorsque le pilonnage précédent se trouve descendu assez près du foyer pour que la température de surface soit également proche de 80° C ; la pellicule salie est préalablement enlevée, la soudure entre deux pilonnages successifs s'exécute alors d'une manière parfaite.

Dans le noyau ainsi préparé on peut, sans le moindre aléa, remplacer la moitié des crasses de cornues en poudre au tamis de 200 par de la chaux vive ayant la même finesse.

Ce remplacement est d'ailleurs indifférent, puisque le diamètre de l'électrode interdit rigoureusement toute participation du noyau à la conduction du courant ; le noyau n'est pas un conducteur, mais une voûte continue.

Avant d'aller plus loin, voici quelques précisions sur la quantité du brai à utiliser et sur la méthode employée aux essais de réception de ces brais. Car c'est là un matériau qui a beaucoup plus d'importance qu'on ne pourrait le croire.

Analyse d'un brai : Carbone libre 26 à 28 pour cent.
Carbone fixe 38 à 40 pour cent.
Densité 1,25 à 1,30.
Point de fusion 40° C. (Essai à la goutte de mercure).

Point de ramollissement. — Par définition, c'est la température à laquelle 0,5 cm³ de mercure traversent une couche de brai de 2 cm de hauteur placée dans un tube ouvert à ses deux extrémités et de diamètre 5 mm.

Par définition, c'est la température à laquelle 0,5 cm³ de mercure traversent une couche de brai de 2 cm de hauteur placée dans un tube ouvert à ses deux extrémités et de diamètre 5 mm.

L'essai est des plus enfantins à conduire, on peut mesurer plusieurs échantillons simultanément en utilisant le montage donné par la

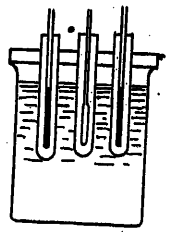


Fig. 4.

figure 4. La température est montée à la vitesse de 2° C à la minute. La goutte de mercure a été préalablement introduite à la partie supérieure des échantillons. La température à laquelle le mercure traverse la couche de brai est prise pour point de ramollissement du brai étudié.

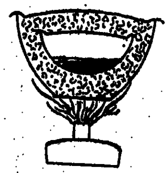


Fig. 5.

Carbone fixe (fig. 5). — On opère sur 0,5 gr environ, pesé exactement dans un creuset de porcelaine que l'on place à l'intérieur d'un autre creuset également en porcelaine avec interposition de poussière de charbon de bois. On place le couvercle sur le petit creuset et, au-dessus, quelques morceaux de charbon de bois, enfin on couvre le grand creuset et on chauffe le tout de façon à atteindre environ 1 000 C, comme pour la détermination des matières volatiles dans les combustibles.

On repèse après refroidissement, le poids resté à l'intérieur est, par définition, le carbonne fixe correspondant à la quantité de brai sec pesé au départ.

Carbone insoluble. — On opère par épuisement au trichlorétylène sur un gramme pendant deux ou trois heures, puis on arrête le chauffage, on laisse égouter le trichlorétylène, on porte à l'étuve, puis on pèse. On recommence la même opération pendant une heure et ainsi de suite jusqu'à ce qu'un nouvel épuisement de une heure ne donne plus de variation de poids.

Les différences de tares à vide et après épuisement donnent le carbone insoluble se rapportant au poids de brai traité.

Suspension mécanique de l'électrode : Une charpente métallique de très grande solidité et située au-dessus du four, supporte une série de pignons disposés concentriquement à l'électrode (fig. 6). L'axe vertical de chacun de ces pignons se confond avec l'axe des fers I de la carcasse métallique de l'électrode. Le moyeu de chacun des pignons est

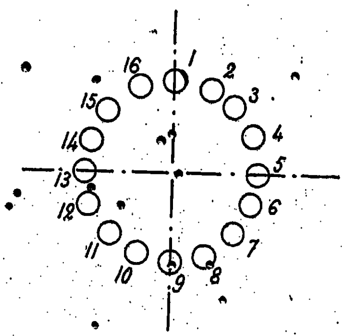


Fig. 6.

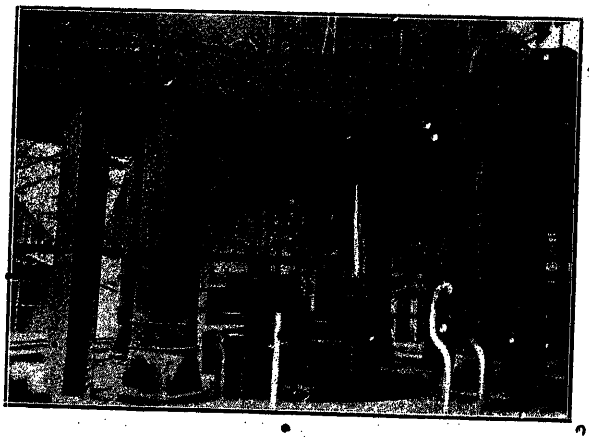
taraudé afin de recevoir une tige filetée d'environ un mètre de longueur. Cette tige est terminée à sa partie inférieure par une crosse qui est réunie solidairement au fer I au moyen d'un éclissage. Si l'on numérote dans un ordre croissant tous les pignons, on verra que tous les numéros pairs sont sollicités simultanément par une même chaîne de transmission recevant son mouvement d'un moteur électrique commandé lui-même par le régulateur Cuenod du four. Les numéros impairs forment un autre ensemble absolument identique et complètement indépendant du premier.

Pour un four comportant une électrode de 16 secteurs, comme ceux de Langerbrugge ou ceux d'Uckange, il y a donc deux jeux de 8 pignons. Un seul de ces jeux est en fonctionnement. Il y a donc toujours la moitié des secteurs qui sont libres de toute suspension, et c'est sur ce jeu que l'équipe chargée de la confection de l'électrode travaille. Ce travail terminé, on branche la suspension n° 2 et, par le

jeu d'un inverseur, on substitue le moteur n° 2 au moteur n° 1. Le jeu n° 1 devient libre, et ainsi de suite. (Cliché n° 1).

Le creuset du four

Le creuset du four Miguet, bien qu'ayant son originalité, est beaucoup moins compliqué que l'électrode. Composé d'une grosse carcasse en tôle pleine (fig. 7) son garnissage latéral intérieur est formé



Cliché 1. — Partie supérieure et suspension de l'électrode. Tuyaux d'aspiration des fumées.

de briques refractaires silico alumineuses, pendant que sa sole est formée de morceaux d'électrodes ordinaires de même composition que

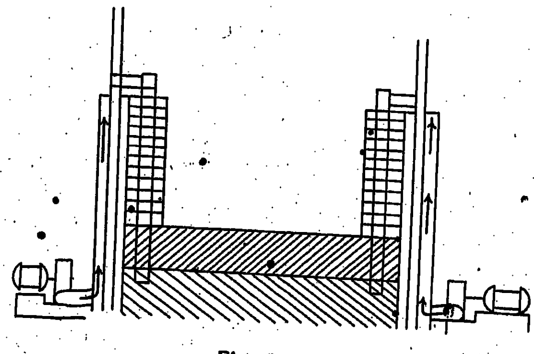


Fig. 7.

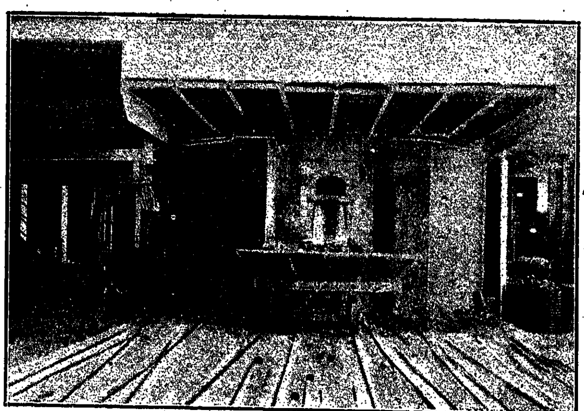
les secteurs d'électrodes, bien que l'on puisse utiliser, pour la sole, des charbons de deuxième choix.

Le tout est enveloppé, dans sa partie inférieure, dans une feuille de plomb soudée dont la raison d'être est uniquement de supprimer toute entrée d'air qui aurait pour inconvénient une oxydation des charbons de sole et leur transformation en cendres.

Latéralement, entre la tôle et les briques de garnissage, se trouvent placées, d'une manière jointive, de grandes plaques à refroidissement



Cliché 1 a. — Suspension de l'électrode.
On remarque les têtes des compensateurs soutenant les plaques de contact.
Au tout premier plan : l'ouverture des trémies de chargement.
Un des tuyaux d'aspiration des fumées.



Cliché 2. — Plancher de la coulée.
Cuve du Four. Gueulard et une lingotière pour le carbure de calcium.

d'eau, si bien que, même par les plus grandes chaleurs, on peut stationner à 50 centimètres du four sans être incommodé.

Le four Miguet est seul à posséder cet avantage.

Les conducteurs électriques dont le point de départ (transformateur) est situé directement sous le four, montent dans des cheminées de tôle accollées directement sur le four (cliché 2); des groupes électro-ventilateur (cliché 3) soufflent à l'intérieur de ces cheminées pour assurer le refroidissement des barres.

Le désandwichage est fait à ras du plancher de travail, les barres de sole sont connectées sur des pièces de bronze à refroidissement d'eau qui descendent dans le briquetage du four et sont scellées au bronze dans la première couche des électrodes de sole.

Les barres d'électrodes sont connectées sur une pièce circulaire



Cliché 3. — Un des groupes électro-ventilateur pour le refroidissement des caissons verticaux accolés au four et contenant les barres d'amenée de courant A droite : Le collecteur des eaux de refroidissement.

d'acier à refroidissement d'eau, appelée cône à cause de sa forme, et de là sont réunies au plaques de contact en bronze à circulation d'eau au moyen de faisceaux de cuivre souple.

Contact électrique à l'électrode

L'amenée de courant sur l'électrode est assurée au moyen de plaques de bronze en nombre égal au nombre des secteurs de l'électrode, et posant directement sur ces secteurs.

Cette solution, qui assurerait un contact défectueux dans d'autres types de fours, est possible dans un four Miguet grâce à l'usinage précis des secteurs dont j'ai parlé au début de ma communication.

Le serrage des plaques est assuré au moyen de vis de serrage commandées de la deuxième plateforme du four.

L'ensemble de cet équipage est supporté au moyen de compensateurs à pression d'huile de telle sorte que, pour faire remonter les pla-

ques de contact quand l'usure de l'électrode l'exige, il suffit simplement de les desserrer, les compensateurs agissant, l'ensemble remonte de quelques dix centimètres, puis on procède au resserrage.

La totalité de cette opération s'effectue sans suspendre la marche du four.

Le chargement automatique

Ce chargement devrait plutôt porter le nom de semi-automatique, le chargement réellement automatique existant d'autre part sur le nouveau four complètement fermé dont MM. MIGUET et PERRON viennent de terminer la mise au point.



Cliché 4. — Un wagonnet de forme spéciale pour le chargement des trémies du four. On voit également la forme spéciale des becs de trémies des silos de matières premières.

De toutes façons la pelle est complètement inconnue sur un four MIGUET.

La deuxième plateforme du four comporte plusieurs séries d'ouvertures de trémies dont l'ensemble, jointif, entoure totalement le four.

Chaque série se trouve disposée comme suit : elle comporte trois ouvertures de trémies dont deux d'une largeur de 1 mètre environ et la troisième de 0,5 mètre seulement. Les deux premières reçoivent l'une, la partie non conductrice du mélange, l'autre la partie conduc-

trice du mélange, la troisième partie reçoit les charges de chaux d'addition.

L'alimentation de ces trémies est faite au moyen de wagonnets spéciaux (cliché n° 4).

La partie inférieure des trémies se trouve au plancher de travail et chacune est munie d'un levier permettant son ouverture pendant le temps désiré, provoquant ainsi la charge du four. Les matériaux tombent de la trémie sur le cône dont j'ai parlé tout à l'heure, ce cône les dirige à la base de l'électrode elle-même.

Quant aux petites trémies d'addition, elles sont toutes commandées simultanément par le jeu d'un seul volant et sont destinées, après un piquage, à l'alimentation en chaux de toute la base de l'électrode.

Le piquage pneumatique

Le piquage pneumatique a été une réelle révolution dans l'utilisation d'un four électrique.

De tous temps et sur tous les modèles de fours, on procédait au piquage du four au moyen de longs et lourds ringards maniés à mains d'hommes. Il était même souvent nécessaire d'utiliser la masse pour pouvoir, à l'aide de ce ringard, casser les croûtes que formaient à l'intérieur du four les morceaux de minerais qui se soudaient entre eux.

Outre les difficultés de ce travail, qui étaient supportées par le personnel ouvrier, il en résultait nettement une baisse du rendement calorifique.

En effet, un piquage, de four à carbure de calcium par exemple, fait à la main sur un four de 2 à 3 000 kW, peut durer de 10 à 20 minutes, pendant lesquelles le four reste déchargé et n'est plus qu'un très ardent brasier. La quantité énorme de calories rayonnées pendant ces 10 ou 20 minutes est évidemment une perte sèche.

Le dispositif Miguet permet de faire le même travail, et d'une façon littéralement impeccable en moins d'une minute, et uniquement par le jeu de deux robinets à air comprimé commandés sans aucune fatigue par un homme.

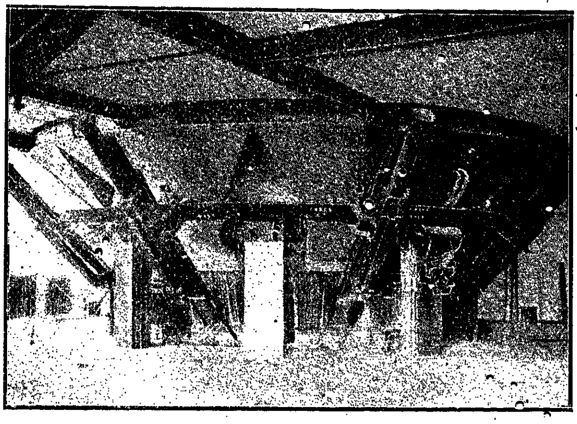
La réalisation de ce dispositif a été résolue très élégamment.

Le four est ceinturé extérieurement par une couronne en acier, (clichés 5 et 6) qui peut recevoir, d'un piston commandé par l'air comprimé, un mouvement de rotation de quelques degrés dans un sens ou dans l'autre.

Cette couronne sert de support à un certain nombre de cylindres

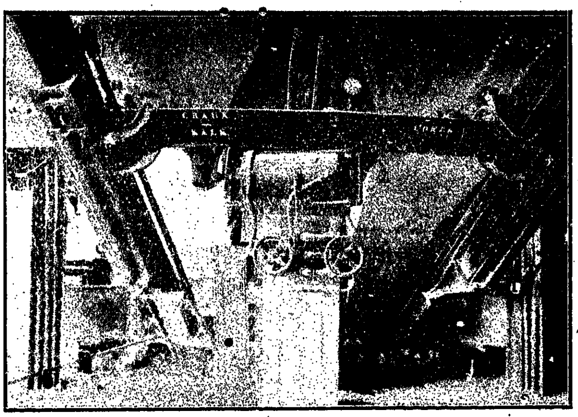
dans chacun desquels un piston se meut également sous l'effet de la pression d'air.

Deux longs ringards sont solidaires de ce piston, tout en étant dis-



Cliché 5. — Plancher de travail.
Vue de la partie inférieure des trémies et ensemble du piquage pneumatique.

posés de part et d'autre du cylindre. Ce sont les extrémités inférieures de ces ringards qui s'enfoncent jusque sous l'électrode au moment du



Cliché 6. — Commande du piquage pneumatique.
Volant gauche = mouvement latéral.
Volant droite = mouvement plongeant simultané des ringards.

fonctionnement de l'ensemble. Il est bien évident que ces ringards sont isolés électriquement de leurs supports afin d'éviter les accidents de courts-circuits qui ne manqueraient pas de se produire si l'un des ringards venait en contact avec l'électrode.

Tous les pistons sont commandés simultanément par un même robinet aussi bien à la montée qu'à la descente.

Le premier piquage terminé, le jeu d'un autre robinet déplace tout l'ensemble (couronne et ringards) de quelques degrés, puis on procède à une deuxième opération de piquage, ce qui fait qu'en quelques dizaines de secondes aucun des points du laboratoire de travail du four n'a pu échapper au bienfaisant piquage.

Protection de la main-d'œuvre contre la chaleur. — La chaleur rayonnante d'un four Miguet est pour ainsi dire inexistante. La seule que l'on pourrait relever ne pourrait provenir que des quelques petites flammes existant autour de l'électrode. Leur rayonnement est intercepté au moyen de rideaux métalliques.

Contre les fumées. — Deux forts aspirateurs sont installés sur la charpente portant la suspension d'électrode. Au moyen de 4 tuyauteries de tôle (cliché 1) ces aspirateurs collectent tous les gaz et les évacuent au-dessus de l'usine par des cheminés de dimensions voulues.

En résumé, le four Miguet ne présente ni fumées gênantes et désagréables, ni chaleur même peu suffocante, ni nécessité de travail pénible et fatigant.

DEUXIÈME PARTIE

Conduite d'un four Miguet

Comme dans tous les fours électriques, le réglage électrique d'un four Miguet est assuré par un régulateur, système Thury. Ce régulateur est construit par la firme Cuenod. Son action peut se reporter :

ou sur les moteurs commandant les suspensions d'électrode ;

c'est la méthode qui a toujours été appliquée en électro-métallurgie ;

ou sur le servo-moteur d'un combinateur posé sur le primaire du transformateur et faisant varier la tension en charge sur une électrode qui reste fixe. C'est là un mode de réglage tout à fait original dont j'exposerai les avantages dans la troisième partie de ma communication.

Cela entraîne évidemment une certaine complication dans la construction du transformateur, puisque l'on est obligé de connecter la presque totalité des entrées et des sorties de galettes haute tension sur un coupleur ayant (à la Société Belge d'électrochimie) 56 positions différentes et pouvant faire varier la tension au secondaire à vide de 24 à 56 V avec une régularité dans la valeur du courant de 2 pour cent environ.

Il est difficile de s'étendre longtemps sur la marche du four MIGUET. Celui-ci a été prévu et construit pour donner une marche sans aléas et des plus simples qui soit.

En effet :

Sur le plancher de coulée, un homme fait la coulée à intervalles réguliers variant avec la puissance mise en jeu sur le four, et avec la fabrication en cours.

Il fait souvent précéder la coulée d'un réchauffage du gueulard par une petite électrode branchée sur l'électrode du four. Sous l'effet du courant, le bouchon qui obstrue le canal entre en demi fusion, il est par la suite rapidement enlevé, et la coulée s'effectue dans une lingottière jusqu'à l'apparition de flammes au trou de coulée, apparition qui confirme que le creuset est bien vide ; l'ouvrier rebouche alors le trou de coulée et le fait savoir à son compagnon du plancher de travail et de chargement.

Ce dernier procède au piquage pneumatique et, celui-ci terminé, ajoute la charge d'additions autour de l'électrode, ceci ainsi que je l'expliquais tout à l'heure, par le simple jeu d'un volant.

Le travail du chargeur consiste alors à faire de temps à autre, assez fréquemment cependant, le tour du four et, en agissant sur les ouvertures d'une trémie ou de l'autre, à charger le four aux endroits où les flammes sortent avec une certaine intensité.

Au bout d'un certain temps, qui correspond à la moitié du temps nécessaire entre deux coulées, il procède à une nouvelle opération de piquage. Mais, pour cette deuxième opération, il isole, pour en empêcher le fonctionnement, et au moyen d'une valve, les ringards de piquage travaillant au droit du gueulard. Ceci pour éviter un éboulement, devant le trou de coulée, des matériaux qui se sont soudés en voûte au-dessus de ce trou. Car il est évident que ces matériaux viendraient obstruer le trou à la prochaine coulée.

Enfin, et d'une façon continuelle, au plancher supérieur, un homme, muni d'un wagonnet spécial, s'occupe de réapprovisionner les trémies au fur et à mesure des besoins.

TROISIÈME PARTIE

AVANTAGES DU FOUR MIGUET

Je n'insisterai pas sur les avantages d'une électrode continue. Tout le monde sait en effet, qu'autrefois, et encore actuellement sur beaucoup d'anciens fours, nous ne disposions que de l'électrode ordinaire qui avait une durée de 3 à 8 jours suivant les fabrications.

Cette électrode était changée lorsque l'usure avait réduit sa longueur à 25 ou 50 centimètres. Le remplacement était excessivement pénible pour le personnel qui se trouvait, pendant l'opération, à une distance excessivement faible du cratère en fusion que laissait la vieille électrode dans la charge du four.

On pouvait admettre qu'un changement d'électrode qui durait de 15 minutes à une heure suivant le mode de connexion, faisait perdre au minimum une ou deux coulées.

D'autre part l'électrode neuve, ayant besoin de refaire sa place dans le minerai, travaillait d'abord en surface, d'où une énorme quantité de calories perdue, et une combustion rapide de l'électrode qui se trouvait en contact franc avec l'oxygène de l'air.

Enfin, quand l'électrode avait retrouvé sa place de bon fonctionnement, sa vie était souvent terminée.

Une électrode continue, qu'elle s'appelle d'ailleurs MIGUET ou SODERBERG, ne présente aucun de ces inconvénients et travaille toujours en profondeur avec le maximum de rendement calorifique.

Chargement automatique : C'est là un perfectionnement très intéressant ; l'ouvrier n'a plus à fournir l'effort du « lancement de la pelle » qu'il faisait seulement quand il était surveillé, et d'autant plus négligemment qu'il était plus ou moins gêné dans ses mouvements par les charpentes métalliques supportant les électrodes.

Son travail sur un four MIGUET est d'autant plus aisé qu'il n'a plus de pelle, que le four ne rayonne plus aucune chaleur, et qu'il n'a qu'à appuyer sur un simple levier au fonctionnement très doux pour faire tomber à l'endroit voulu la quantité nécessaire de matériaux.

Alimentation hétérogène : Considérons le cas du carbure de calcium, bien que le même raisonnement puisse être également rapporté à d'autres fabrications.

La seule réaction de réduction de la chaux par le carbone suivant la formule :

$$CaO + 3C = CaC^2 + CO$$

ne saurait expliquer les pertes relativement importantes (10 pour cent environ) de matières premières.

D'autre part, les matières premières en traitement sont trop rapidement renouvelées pour permettre, de manière importante, soit la volatilisation de la chaux à réduire, soit la combustion du coke au contact de l'oxygène de l'atmosphère. Tout au plus peut-on admettre des pertes par entraînement de poussières et des pertes par combustion

dont le total ne dépasse pas 3 pour cent. Pour les 7 pour cent supplémentaires il faut admettre une dissociation du carbure suivant la réaction réversible

$$CaC^2 = Ca + C^2.$$

En fait, le carbure se dissocie dans le voisinage inférieur, et contre les parois chaudes de l'électrode ; les vapeurs viennent brûler en surface et se dégagent en grande partie vers les parois du four.

Il en résulte une consommation excessive en courant et matières premières.

Réduction des consommations : Il importe donc d'éviter dans la mesure du possible, cette dissociation en diminuant la surchauffe dans la région intéressée ; cette diminution ne peut être obtenue qu'en provoquant l'épanouissement du courant dans la masse soumise à la réduction, c'est-à-dire en améliorant la conductibilité de celle-ci.

Une telle amélioration est obtenue en augmentant l'importance volumétrique du carbone par l'utilisation d'un coke très menu, et, comme tel, se dispersant mieux entre les fragments de chaux ainsi que par le procédé de lits de fusion hétérogènes.

Cette amélioration ne devient toutefois effective qu'à la faveur d'un chargement en tranches d'orange, qui substitue la conductibilité stable des colonnes de coke régulièrement distribuées autour de l'électrode à celle du mélange dit « conducteur » celle-ci étant nécessairement mitigée tant par la présence obligatoire de la première moitié de chaux, que par les additions intermittentes de la seconde moitié.

En ce qui concerne les grosseurs, l'expérience a démontré qu'il convient de choisir, pour la chaux celle de 30/60 ; pour le coke celle de 20/40 ; la structure en bâtonnets étant pour celui-ci préférable à toute autre.

Utilité secondaire de la pâte centrale du noyau de l'électrode : Le noyau de l'électrode présente un avantage secondaire et particulièrement intéressant.

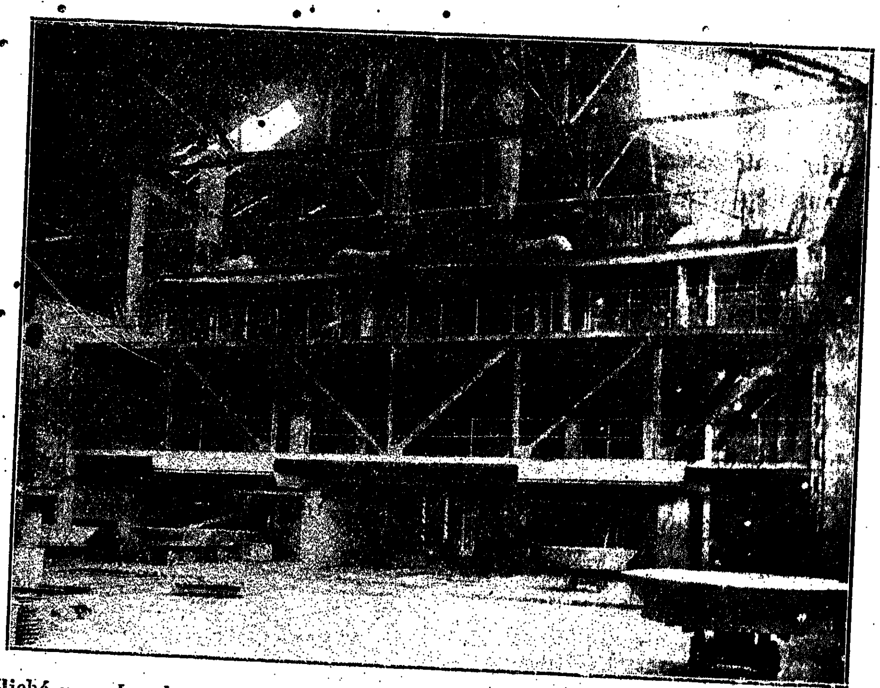
Il a été expliqué tout à l'heure et cela se conçoit, vu les dimensions de l'électrode, que la partie centrale ne conduit pas le courant, ce n'est, en quelque sorte qu'une voûte continue.

Nous venons de voir aussi qu'une partie du carbure avait tendance à se dissocier au voisinage des parties surchauffées du four.

Si une partie des vapeurs de calcium viennent brûler à la surface du four, une autre partie par contre, prisonnière sous la partie cen-

trale de l'électrode, se recombine au carbone de celle-ci et redevient carbure au grand avantage du rendement.

Il a été en effet remarqué que, dans la fabrication du carbure de calcium, le noyau central s'use avec la même vitesse que les secteurs périphériques, tandis que dans la fabrication du manganèse par exemple, l'usure du noyau présente un certain retard sur celle des secteurs. Cela peut s'expliquer par ce fait que l'élément Mn ne cherche pas à se recarburer.



Cliché 7. — Les deux fours MIGUET 4 000 kW de la Société Belge d'Electrochimie

Piquage pneumatique. Il a été suffisamment insisté tout à l'heure sur l'avantage de cette réalisation de M. MIGUET pour passer sur ce point.

Electrode fixe : La réalisation de la marche du four à électrode fixe, a surtout été en ses débuts un premier pas vers la réalisation, qui est maintenant un fait accompli, du four complètement fermé.

Seule une électrode fixe peut en effet permettre la confection d'un joint de presse étoupe satisfaisant.

Mais il y a aussi d'autres avantages d'intérêt beaucoup plus direct.

Ainsi, les mouvements continuels ascendants et descendants de l'électrode ont toujours tendance à provoquer des éboulements dans

la charge, ce qui est très préjudiciable à la bonne tenue d'une coulée, principalement si ces éboulements ont lieu immédiatement avant la coulée.

D'autre part : certaine usine a dernièrement essayé de marcher uniquement sur les excédents de courant de sa centrale thermo-électrique, ce qui l'obligeait, pendant ses heures de pointes, à arrêter totalement le fonctionnement de ses deux fours MIGUET munis du montage SCOTT. Pour éviter, à la remise en marche, et par suite d'une solidification ou semisolidification de la masse des matériaux en traitement, de travailler avec une électrode trop haute, celle-ci a été maintenue fixe avec démarrage à la tension minimum du combinateur. Après la première coulée, l'électrode pouvait être rendue mobile, et il n'en résultait qu'une faible diminution du rendement par rapport à la marche continue. Si on allie donc ce résultat tout à fait intéressant à ceux obtenus par les nouvelles chaudières à très hautes pressions de l'ordre de 224,2 kg : cm², il apparaît que, ce qui fut pendant longtemps considéré comme une hérésie (équiper des fours sur courant thermique) est devenu aujourd'hui une possibilité économique.

QUATRIÈME PARTIE

RÉSULTATS OBTENUS

Deux fours MIGUET ont fonctionné sous la direction de l'auteur à une puissance de 9 000 kW avec :

Un chef d'équipe.
Deux hommes à la coulée.
Deux hommes au chargement.
Deux hommes au mélange.
Soit donc uniquement 7 hommes.

Le personnel chargé de la confection des électrodes, est rattaché au service entretien.

Sur une fabrication de carbure de 275 à 285 l destinée à alimenter une fabrication de cyanamide calcique 23/24 pour cent d'azote, l'auteur a souvent obtenu une consommation de 3 000 kWh à la tonne. Cela lui a permis de fixer ensuite un kilogramme d'azote avec une consommation de 10 kWh tout compris et quelquefois moins.

EMPLOI DE L'ULTRA-FILTRATION SOUS LE VIDE POUR L'ENTRETIEN DES HUILES ELECTRIQUES ET LES MISES A HUILE [1]

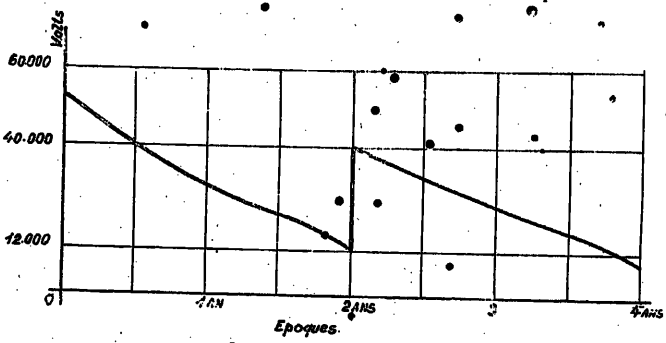
par M. Texier

Administrateur-Directeur de la Société M. A. X. E. I.

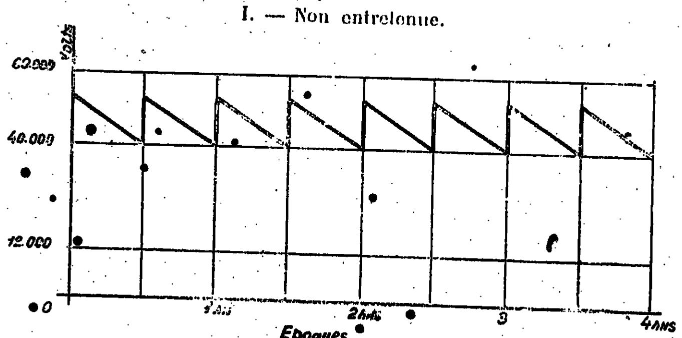
Généralités. — Impuretés. — Appareillages employés. — Ultra filtration. — Action du vide. — Mise à huile des transformateurs.

Généralités

Les huiles électriques peuvent conserver leurs qualités initiales si



I. — Non entretenue.



II. — Entretenue périodiquement.

Fig. 1. — Diagramme de rigidité d'huile.

elles sont périodiquement entretenues. Cet entretien devant consister

(1) Communication présentée à la séance du 15 février 1932 de la 4e section, et à la séance mensuelle du 6 avril 1932 de la Société française des Electriciens.

dans l'enlèvement intégral des impuretés qui s'y déposent ou qui s'y forment.

Ce résultat n'a jamais pu être réalisé, jusqu'ici, par des procédés simples et pratiques. Il présenterait cependant pour l'exploitant un intérêt de premier ordre, car il permettrait d'éliminer les nombreux incidents dont la cause directe ou indirecte réside dans l'altération de l'huile.

Les diagrammes de la figure 1 schématisent cette remarque.

Impuretés

Les impuretés des huiles sont essentiellement :

les poussières ;

les déchets d'isolants ;

l'eau (soit en émulsion, soit dissoute) ;

l'air occlus ou dissous ;

les gaz ou liquides condensés divers qui se forment au sein de l'huile par suite de son usage (2).

Les suspensions solides pouvant descendre jusqu'aux dimensions colloïdales, provenant de modifications moléculaires, par suite de la température élevée des arcs notamment. Ce sont principalement des suspensions de carbone.

Appareillages employés

Les appareillages employés dans la pratique pour le traitement des huiles peuvent se classer en 3 catégories :

Les centrifuges ;

les filtres ;

les déshydrateurs sous le vide.

Nous citerons, pour mémoire, les procédés chimiques (précipitation, floculation). Ces procédés, d'un usage difficile à la sous-station, exigent d'ailleurs l'emploi complémentaire des appareillages ci-dessus.

Les centrifuges et les filtres ne peuvent pas enlever l'eau dissoute ni, d'une manière générale :

---

(2) Parmi ces impuretés, nous signalons la présence d'acides, notamment SO^4H^2, qui semble provenir de SO^2 de l'atmosphère, ou de trace de S dans l'huile. Les surfaces métalliques, le cuivre en particulier, activant le phénomène.

L'eau contenue dans l'huile dilue ces acides, produisant une ionisation. Le degré d'ionisation est d'autant plus élevé que la dilution est plus forte, ce qui provoque un abaissement corrélatif de la rigidité diélectrique (fig 2).

L'effet de cette ionisation se trouve accentué quand l'huile contient des suspensions colloïdales conductrices.

— les liquides étrangers en solution, les gaz.

Les suspensions qui sont d'une densité égale ou inférieure à celle de l'huile échappent, évidemment, complètement à l'action centrifuge.

Les autres suspensions sont éliminées suivant leur grosseur et leur densité.

Le calcul et l'expérience montrent que, pour un centrifuge donné, choisi parmi les plus puissants, (force centrifuge = 14 000 fois l'action de la pesanteur) il n'est pas possible d'enlever, à son débit nor-

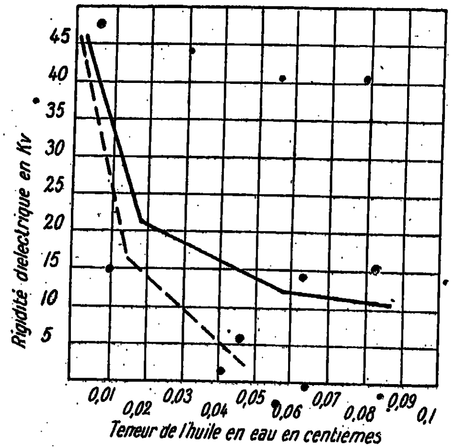


Fig. 2. — Effet combiné de l'acidité et de l'humidité dans une huile isolante.

——— courbe de la rigidité d'une huile en fonction de son humidité (eau pure).

– – – – courbe de la rigidité de la même huile, avec les mêmes variations d'humidité et une teneur en acide constante.

Nota. — On voit que cette teneur en acide a une influence presque nulle si l'huile est parfaitement déshydratée.

Mais l'effet de l'acidité croît avec la teneur en eau et devient extrêmement important pour des valeurs absolues, cependant faibles de cette teneur en eau.

mal, toutes les suspensions de densité 1, et de diamètre 30 à 40 microns.

L'examen microscopique confirme le calcul.

Les filtres ne retiennent les fines suspensions que lorsqu'ils sont fortement colmatés, c'est-à-dire quand leur débit est tombé à une faible valeur.

Il convient à ce sujet de remarquer que :

Leur efficacité pour les suspensions croît en raison inverse du débit ;

tandis que leur faculté d'absorption de l'eau décroît avec ce débit.

Ils ne peuvent donc pas, quel que soit le régime, résoudre parfaitement le problème.

Ces remarques nous conduisent à signaler la confusion qui s'établit souvent dans le choix du débit de ces appareils (centrifuge et filtre).

Le débit *efficace* dépend — non seulement de la viscosité de l'huile, comme on est accoutumé de le croire — mais aussi des dimensions des particules limites que l'on désire éliminer.

Pour les *centrifuges*, ce débit varie théoriquement en raison inverse du carré du diamètre de la particule limite. Par exemple, un centrifuge qui enlève des particules de diamètre limite 55μ au débit de 1 500 l/h ne devra plus débiter que : $1\,500 \times \left(\frac{17,5}{55}\right)^2 = 150$ l, si l'on veut enlever toutes les particules de 17,5μ. Autrement dit, si l'on veut tripler l'efficacité de l'appareil, il faut réduire son débit de 90 pour 100.

En pratique, pour diverses causes secondaires, ce débit devra être encore plus faible.

Dans les *filtres*, le débit diminue également dans des proportions considérables, sans qu'il soit possible de donner une règle.

Le débit en huile neuve, ne contenant pas d'impuretés, dépend de la viscosité. Mais ce débit n'a qu'un intérêt relatif pour l'exploitant qui doit uniquement considérer le débit sur l'huile usagée qu'il aura à traiter dans la pratique. *Cette considération ne doit jamais être perdue de vue dans le choix du débit d'un appareil de traitement d'huile.*

Les *déshydrateurs* sous le vide, quand ils sont bien conçus, enlèvent parfaitement les gaz et les liquides dissous, mais ils ne réalisent pas les filtrations.

On a tenté de résoudre le problème par l'emploi combiné de cuiseur sous le vide et de filtres presse ou de centrifuges, mais pour les raisons fondamentales que nous venons d'exposer, les résultats obtenus demeurent insuffisants. Si les cuiseurs sous le vide peuvent remplir leur but, le filtre-presse et le centrifuge ne demeurent, pour cette application particulière, que des appareils dégrossisseurs.

L'ultra-filtration

Les ultra-filtres sont généralement réalisés par des membranes de nitro-cellulose. Malheureusement, ces membranes sont fragiles et ne peuvent pratiquement pas supporter la pression nécessaire :

— d'une part à un débit industriel ;
— d'autre part au décolmatage.

On est arrivé à obtenir ces résultats tant cherchés, non pas avec des membranes de collodion ou des gelées de nitro-cellulose, mais avec un dispositif de colonnes filtrantes à éléments lamellaires imperméables.

Ces éléments lamellaires ont la forme de rondelles et définissent, quand ils sont empilés, des tubes (voir fig. 4).

Ces tubes constituent dans le filtre un véritable faisceau tubulaire.

L'huile sale baigne la surface extérieure des colonnes filtrantes. Le vide qui règne dans le tube central aspire l'huile qui chemine entre



Fig 3. — Elément ultra-filtrant recouvert d'impuretés.



Fig. 4. — Le même élément après nettoyage à l'air comprimé.

les surfaces des éléments lamellaires. La nature de ces surfaces et la pression qu'elles exercent entre elles définissent des canaux d'ultra-filtration ; l'augmentation de la pression de ces surfaces augmentant la finesse de la filtration.

En réalité, l'ultra-filtration s'opère :
— d'une part sur la surface extérieure de la colonne ;
— d'autre part sur une frange très courte de la surface des éléments lamellaires.

C'est ainsi, par exemple, que dans l'ultra-filtration des huiles de disjoncteurs, les suspensions colloïdales sont arrêtées dans une frange qui ne dépasse pas 1 mm.

La très grande surface filtrante sous un volume très réduit permet d'obtenir un débit sensiblement constant pour les huiles usagées de transformateurs, et peu variable pour des huiles usagées de disjoncteurs.

D'ailleurs, on peut rétablir le débit de l'ultra-filtre à volonté, par la simple manœuvre d'une manette.

Cette opération a pour effet d'établir, dans le canal central de la colonne, une pression qui nettoie les canaux de la frange et détache le bloc des impuretés déposées à la surface extérieure de la colonne (fig. 3 et 4).

Ces impuretés tombent dans le fond du filtre et sont évacuées automatiquement.

Les impuretés, par le principe même de l'appareil s'arrêtent à la surface externe, où elles constituent un préfiltre. Les colonnes filtrantes ne se colmatent pas. Leur durée est donc très prolongée : une année au minimum dans la normale des cas. Le changement de ces colonnes est d'ailleurs très facile et plus aisé que le remplacement du bloc de buvards d'un filtre-presse, par exemple.

La finesse de l'ultra-filtration dépend, comme nous l'avons dit, de la nature des surfaces des rondelles de l'élément du filtre et de leur serrage. Pratiquement, et pour un débit industriel, l'ultra-filtre ne laisse pas passer les suspensions supérieures à 0,1 micron (soit $\frac{1}{10000}$ mm).

Cette dimension extrêmement petite est de l'ordre de grandeur des suspensions colloïdales. L'examen microscopique avec le grossissement mille donne, dans ces conditions, une tache optiquement vide.

L'action du vide

La déshydratation s'opère à la sortie des colonnes filtrantes, l'huile se répandant en surfaces extrêmement minces sur des déversoirs appropriés. Leurs dispositions éliminent l'effet des mousses, qui ne permettent pas, dans les appareils ordinaires, l'usage du vide profond.

Le chauffage — sans contact direct des éléments et de l'huile — est appliqué à la zone même où se produit la vaporisation. Ceci est une condition essentielle de la meilleure utilisation des calories, et permet d'abaisser au minimum la température de l'huile, sans affecter l'efficacité de l'appareil.

Le vide *profond* qui s'exerce sur les pellicules d'huile en mouvement lent, en extrait les gaz occlus ou dissous ainsi que l'eau vaporisée.

Cet emploi du vide profond a une grande importance dans ce problème, où l'on procède sur des teneurs en eau très faible.

Considérons, par exemple les vides suivants :

1° Vide de 90 pour 100 soit $P = 76$ mm.

2° Vide de 99 pour 100 soit $P = 7{,}6$ mm,
et une température unique de 90° C dans l'huile.

La vitesse d'évaporation a pour expression :

$$V = KS\,(P - P_1)$$

où P est la tension de vapeur à T° = 90° C,

et P_1 est la pression partielle de la vapeur dans la zone d'évaporation.

Dans le 1er cas, on aura :

$$V_1 = KS\,(526 - 76) = 450\ KS,$$

et dans le 2e cas :

$$V_2 = KS\,(526 - 7{,}6) = 518{,}4\ KS.$$

D'où $V_2 = 1{,}15\ V_1$.

Donc, pour une amélioration du vide de 9 pour cent, on a augmenté la vaporisation de 15 pour 100.

Dans ces conditions, l'efficacité est telle, que sous une température de 90° C, l'appareil peut capter — en *seul passage* — un poids d'eau égal à 3 pour 100 du poids de l'huile.

Cette eau est d'ailleurs condensée et contrôlable à chaque instant.

Nous donnons au tableau ci-après quelques résultats d'essais effectués au Laboratoire Central d'Electricité qui montrent le degré de perfection de cet appareil.

Désignation de l'huile	Traitement au vacuum ultra-filtre	Tension de claquage U. S. E. (1)	Observations
Huile de transformateur neuve A sortant d'un bidon plombé (tension indiquée par le fournisseur : 75 000 v.)	avant traitement..	30 000 V	Huile incolore. Etincelles à 12 000 V.
d°	après *un seul* traitement	75 000 V 79 000 V (2)	*Claquage franc.*
Huile de transformateur souillée B	avant traitement..	10 000 V	Huile opaque noire. Etincelles à 2 000 V.

(1) Température de l'huile : 15° C.

(2) Quand le tableau indique 2 ou 3 tensions de claquage, c'est qu'il a été réalisé plusieurs essais au spintermètre à titre de contrôle.

Les différences enregistrées proviennent du soin plus ou moins grand apporté par l'opérateur au lavage du spintermètre et des éprouvettes de prélèvement; tous ces essais ayant été effectués à la suite.

Désignation de l'huile	Traitement au vacuum ultra-filtre	Tension de claquage U. S. E. (1)	Observations
Huile de transformateur souillée B	après *un seul* traitement	82 000 V	*Claquage franc.* Huile incolore, optiquement identique à l'huile neuve A.
Huile de disjoncteur neuve C tension indiquée par le fournisseur : 50 000 v.)	avant traitement..	43 000 V 30 000 V (2) 38 000 V	Huile jaune clair. Claquage franc.
d°	après *un seul* traitement	86 000 V 73 000 V (2) 84 000 V	Claquage franc.
Huile de disjoncteur usagée D ..	avant traitement..	15 000 V 13 000 V (2)	Huile très foncée. Etincelles à 9 000 V. Claquage franc.
d°	après *un seul* traitement	75 000 V 80 000 V (2) 76 000 V	*Claquage franc.* Huile optiquement identique à l'huile neuve C.

(1) Température de l'huile : 15° C.
(2) Quand le tableau indique 2 ou 3 tensions de claquage, c'est qu'il a été réalisé plusieurs essais au spintermètre à titre de contrôle.
Les différences enregistrées proviennent du soin plus ou moins grand apporté par l'opérateur au lavage du sprintermètre et des éprouvettes de prélèvement; tous ces essais ayant été effectués à la suite.

Il ne faut pas croire qu'une telle perfection soit pratiquement superflue. La variation du taux d'impuretés d'une huile dans la zone pratique d'utilisation a en effet, une influence très grande sur la rigidité.

La courbe de cette rigidité (fig. 5), en fonction de la teneur en éléments étrangers, est d'une allure hyperbolique. Comme on se trouve en pratique, au voisinage de l'axe des rigidités, et que cet axe est asymptote à la courbe, il s'en suit qu'une variation faible de la tension en impuretés produit une variation importante de la rigidité.

Considérons, par exemple :

— Une huile à teneur d'humidité 0,025 pour cent, claquant à 20 000 V.

— Si la teneur en humidité est ramenée à 0,0125 pour cent, soit 1/2 de la teneur initiale, elle claque à 40 000 V (soit au double de la valeur initiale.)

Cette remarque explique l'influence de l'eau et de l'air dissous, bien que la proportion de ces impuretés soit relativement très faible.

Si l'eau est en présence d'acide, le phénomène est encore plus accentué (voir fig. 2).

A teneur en acide égale, l'ionisation croîtra avec l'augmentation de la teneur en eau. Cette variation ne dépend d'ailleurs pas de la valeur absolue des quantités d'acide et d'eau, mais de leur proportion relative. Le phénomène sera marqué même pour de simples traces des 2 corps étrangers. Son effet étant d'ailleurs très accentué par la présence de suspensions colloïdales conductrices (carbone de l'huile des disjoncteurs).

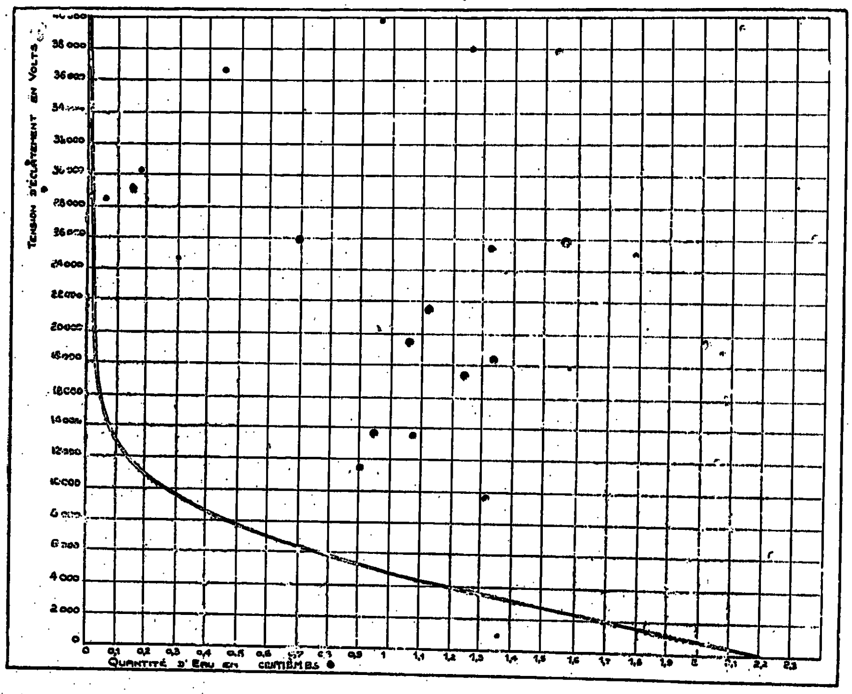


Fig. 5. — Courbe de rigidité diélectrique d'une huile.
Essai au spintermètre U. S. E.

Ces remarques expliquent pourquoi on peut arriver à annuler, grâce à la perfection de la purification, les effets d'une acidité normale et à améliorer des huiles absolument neuves, dans des proportions considérables. Nous détachons, à ce sujet, au tableau précédent, les résultats ci-après :

		Après traitement	Amélioration en pour cent
A. Huile de transformateur neuve	30 000 v. U. S. E.	79 000	165
B. Huile de transformateur souillée ...	10 000 v.	82 000	680
C. Huile de disjoncteur neuve, en moyenne	37 000 v.	81 000	120
D. Huile de disjoncteur usagée (1 an 1/2), en moyenne	14 000 v.	77 000	450

Nota. — L'huile de disjoncteur usagée D était, à l'origine, de l'huile neuve C. Sa rigidité après un seul traitement est donc passée à :

95 pour cent de celle de l'huile neuve (traitée dans notre appareil), et 210 pour cent de celle de l'huile neuve prise chez le fournisseur.

L'appareillage ainsi combiné permet de traiter l'huile :

soit d'une capacité fixe (citerne), soit d'un transformateur ou d'un disjoncteur, même en service.

Il permet, en outre, le traitement, en circuit continu, de la capacité d'un transformateur ou d'un disjoncteur.

L'opération ainsi réalisée constitue une excellente méthode pour le séchage même du transformateur, l'huile purifiée, parfaitement anhydre et pure, servant de véhicule des calories.

L'humidité qui s'échappe du transformateur se trouve, à chaque instant, captée dans l'appareil. Cette méthode constitue un procédé parfait de mise à huile sur place à la sous-station. L'appareillage est léger, peu encombrant et mobile, (figure 6).

Mise à huile des transformateurs

La mise à huile d'un transformateur est l'opération complexe qui consiste, non seulement à remplir le transformateur avec une huile purifiée et déshydratée, mais aussi à sécher les parois des cuves, les noyaux magnétiques et les bobinages.

Pour les grands transformateurs, qui ne peuvent pas être expédiés dans leur bain d'huile, cette opération doit être faite, à nouveau, à la sous-station, dans des conditions évidemment bien moins bonnes qu'à l'usine où l'on dispose d'appareillages spéciaux.

Or, ces grands transformateurs sont généralement à haute tension et la nécessité d'une bonne mise à huile s'impose.

Les méthodes employées sont variables :

Elles peuvent, néanmoins, être classées en deux catégories principales :

a) *Séchage séparé* des colonnes et des circuits magnétiques ; *déshydratation de l'huile ;*

b) *séchage de l'ensemble* : colonnes, circuits magnétiques et huile, *dans le bain d'huile même.*

Cette dernière sert de fluide médium pour la transmission des calories et de véhicule à l'humidité dissipée.

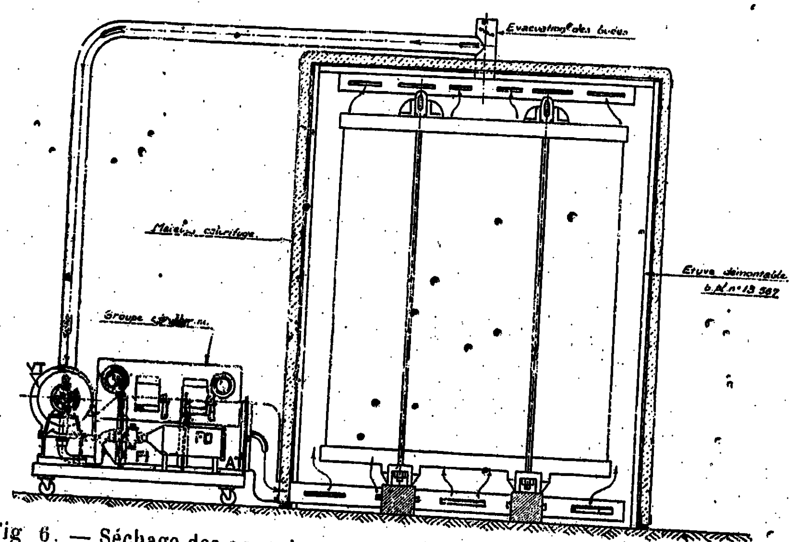


Fig. 6. — Séchage des enroulements de gros transformateurs par air chaud.

VT. — Ventilateur.
AT. — Aérotherme.
FD. — Dessicateur d'air.
FI. — Filtre d'air.

a) Le séchage séparé des colonnes et des circuits magnétiques s'opère généralement par insufflation d'air chaud ; les noyaux du transformateur étant placés, soit dans sa propre cuve, soit dans une étuve *ad hoc.*

La 1[re] disposition (séchage dans la cuve) est évidemment la plus simple, elle serait aussi bonne que la seconde (séchage à l'étuve) si les fabricants de transformateurs prévoyaient leurs cuves en conséquence, c'est-à-dire avec des tubulures d'entrée et de sortie d'air de dimensions et de formes convenables.

Présentement, ces orifices sont beaucoup trop petits et le débit d'air qu'il est pratiquement possible de faire circuler est si faible que l'opération prend une durée exagérée. Si l'on augmente la puissance

du calorigène, la température de l'air à l'entrée du tranformateur devient excessive et carbonise les isolants.

Avec une étuve, ces inconvénients peuvent naturellement être évités. Les fig. 7 et 8 représentent un dispositif d'étuve démontable qui peut être édifié en 1 heure autour d'un noyau de transformateur. Ses parois sont constituées par des manteaux calorifuges à pose rapide.

L'air chaud est fourni par un groupe calorigène à chauffage électrique disposé avec un filtre à air à spires imbibées d'huile.

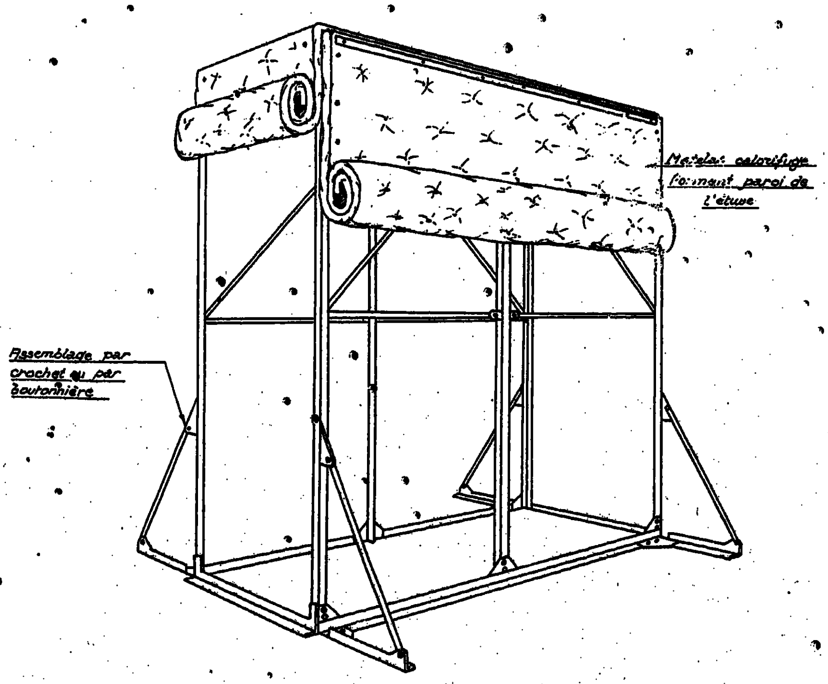


Fig. 7 — Etuve démontable pour séchage d'enroulements de gros transformateurs par air chaud.

Avec cette disposition d'étuve, il est possible de dissiper au calorigène des puissances relativement élevées ; par exemple 40 kW et d'assurer, ainsi, un séchage complet d'un gros transformateur dans des temps raisonnables avec une température convenable.

Le traitement de l'huile est généralement effectué comme suit :

filtration préalable de l'huile ;

puis cuisson de cette huile dans la cuve du transformateur avec réchauffage (par mise en court-circuit du secondaire ou par résistances immergées).

Nous faisons observer à ce sujet, que le dispositif de cuisson de l'huile à la pression atmosphérique devrait être absolument prohibé.

Le dégagement de l'humidité au sein d'une masse importante d'huile est très difficile. Sauf sur la surface libre, ce dégagement ne peut se faire que par ébullition. Or, l'ébullition exige, dans le sein du liquide, la présence d'un gaz, sinon elle est extrêmement retardée. Comme les mouvements de convection sont lents, l'amenée des vésicules d'eau à la surface libre — la seule effective — est lente. Il faut un temps considérable pour déshydrater complètement la masse d'huile, qui s'oxyde au cours de l'opération.

b) Dans la 2e méthode, le traitement s'effectue dans le transformateur lui-même complet dans son bain d'huile. Le réchauffage se fait : soit par la mise en court-circuit du secondaire, soit par des résistances immergées, soit par un dispositif de réchauffeur extérieur, en liaison avec le transformateur par une pompe à huile.

L'huile du transformateur, réchauffée dans ce cuiseur, retourne au transformateur. L'ensemble s'échauffe progressivement. L'humidité dégagée au sein de l'huile se vaporise à la surface libre.

Cette méthode, qui provoque une agitation artificielle rapide de l'huile, est plus favorable au dégagement de l'humidité que la cuisson dans la cuve propre du transformateur, mais il est nécessaire d'enlever la vapeur qui se dégage à la partie supérieure du transformateur. Nous préconisons dans ce cas, le pompage sous un faible vide (compatible avec la fabrication du transformateur). Ou bien, si le transformateur ne le permet pas, l'aspiration sous une dépression de quelques centaines de millimètres avec un ventilateur approprié. Sans cette précaution, d'abondantes condensations se font sur les parois supérieures du transformateur. Ces condensations retournent dans l'huile et recommencent ainsi leur circuit, échappant à l'action du système déshydrateur.

Certains constructeurs prévoient le transformateur autoclave, la disposition permettant la cuisson sous vide de tout l'ensemble.

Cette méthode qui conduit, évidemment, à une fabrication très coûteuse, n'est pas aussi avantageuse qu'elle peut le paraître *à priori*.

La pression absolue dans la partie supérieure du transformateur est ainsi abaissée, ce qui favorise grandement l'évaporation à la surface libre, mais les vésicules d'eau qui se trouvent incorporées dans la masse d'huile du transformateur et généralement à sa partie inférieure, échappent à cette action favorable. Il ne faut compter dans ce cas que sur les mouvements de convection lents pour amener la vaporisation, si bien que l'opération demeure longue. Mais elle a au moins

l'avantage de ne pas provoquer l'oxydation de l'huile et d'extraire l'air occlus.

Nous présentons à la figure 8 un dispositif de *Vacuum ultra filtre* permettant de réaliser les mises à l'huile dans les conditions optima.

L'huile est aspirée par le vide à la base du transformateur. Elle est ultra-filtrée, puis déshydratée et dégazéifiée par son passage dans l'appareil spécial qui fait suite à l'*Ultra filtre*. Elle retourne parfaitement anhydre et chaude au transformateur. L'humidité libérée au sein de l'huile est captée à chaque passage de l'appareil. Si le transformateur s'y prête, la pompe à vide du dispositif peut établir une dépres-

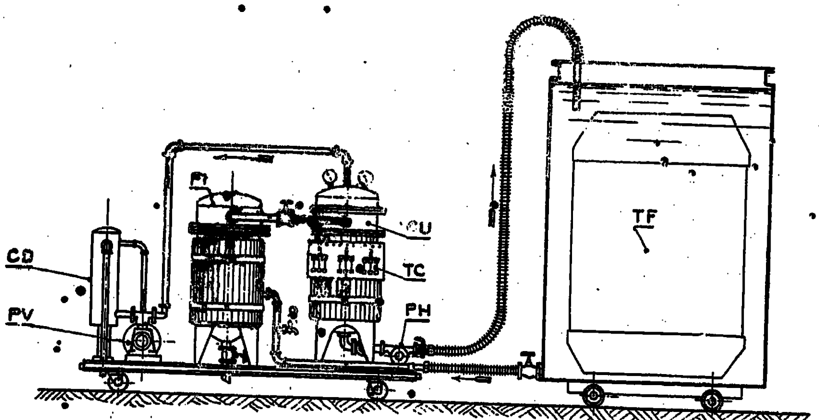


Fig. 8. — Mise à huile d'un transformateur par Vacuum-Ultra-Filtre.

TF. — Transformateur.
CU. — Dégazeificateur d'huile.
FI. — Ultra-filtre.
9. — Robinet de prélèvement.
PH. — Pompe à huile.
PV. — Pompe à vide.
CD. — Condensateur.
TC. — Tableau de contrôle.

sion sur la calotte du transformateur, évitant ainsi toute condensation.

La mise à l'huile des plus gros transformateurs peut être ainsi faite en un temps raisonnable.

C'est ainsi que sur un transformateur (non autoclave) de 6.000 KVA à 60 000 V, nous avons pu réaliser une mise à l'huile complète dans des conditions très pénibles par suite du stockage prolongé de noyaux dans un local très humide, en un temps de 150 heures. La quantité d'eau captée était de 17 l. L'isolement de la haute tension à 88° C était à la fin de l'opération de 25 méghoms. Cet isolement a été ensuite trouvé de 500 méghoms environ à la température ambiante de 15° C. (Fig. 9).

Si l'on ne veut pas demander à l'huile tout le travail de séchage que comporte une bonne mise à l'huile, on emploiera avantageusement une méthode mixte :

— séchage des noyaux et des parois des cuves par air chaud ;

— puis achèvement de la mise à huile par le dispositif dont nous venons de parler.

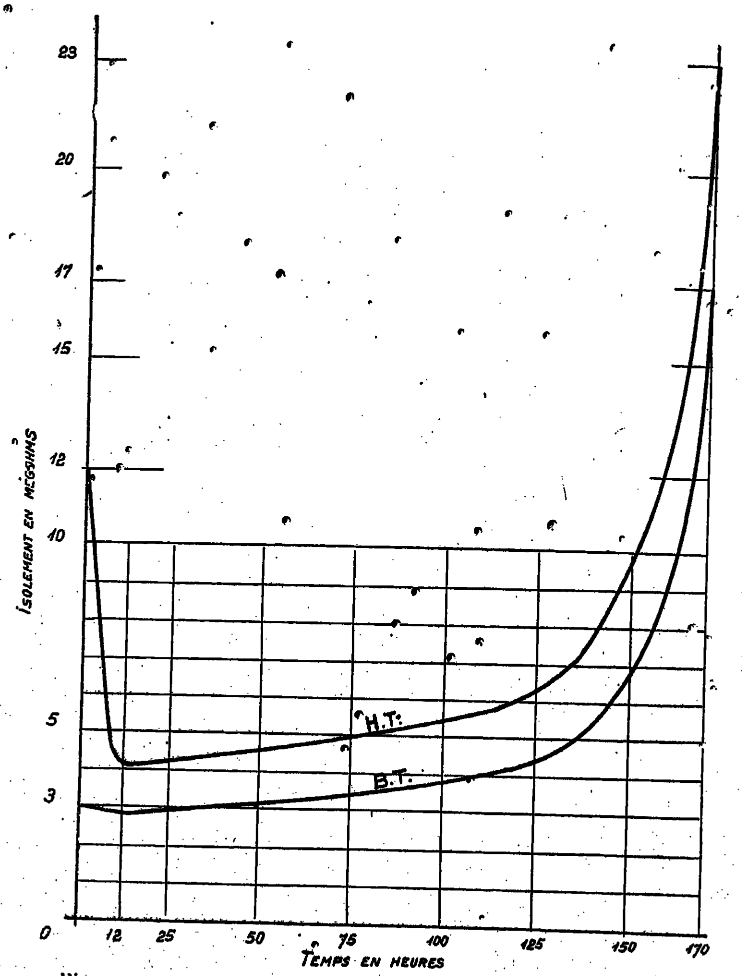


Fig. 9. — Mise à huile d'un transformateur de 5 000 kVA à refroidissement naturel.

Poids de la cuve : 5 T; Poids du noyau : 20 T; Quantité d'huile : 8 000 l

Isolement à froid (10° C) avant mise à huile } HT : 12 Ω
BT : 3 Ω

Température de l'huile au bout de 12 h à la sortie du transformateur : 88° C (maintenue pendant tout le traitement).

Isolement à 88° C à la fin du traitement de 170 h } HT : 23 Ω
BT : 17 Ω

Isolement à 15° C : 500 Ω

Nota. — Cette mise à huile était particulièrement difficile, le transformateur ayant séjourné plusieurs semaines dans un local très humide. C'est ainsi qu'il a été recueilli, au condensateur du « Vacuum-Ultra-Filtre », 17 l d'eau. Le remplissage initial a été fait avec de l'huile neuve dont la tension de claquage initial, 28 500 V, a été portée à 32 600 V à la fin du traitement (tension mesurée au spintermètre à boules de 35 mm de diamètre écartées de 2 mm). Température 15° C.

L'opération est ainsi notablement plus courte, et l'huile chauffée

pendant un temps plus court est évidemment moins fatiguée. Cette méthode est particulièrement à recommander pour les gros appareils.

Nous faisons observer que la mise à huile de grands transformateurs peut être notablement abrégée quand les circuits magnétiques, au lieu d'être isolés au papier, sont isolés à l'émail. Cette méthode d'isolation des tôles qui tend à se répandre a de nombreux avantages :

— L'épaisseur très régulière du film isolant est d'environ 1/100ᵉ de millimètre, soit approximativement 8 fois moins que l'isolation au papier. Il en résulte que le flux magnétique à volume total égal, est augmenté d'environ 12 pour cent, d'où une diminution correspondante de la spire moyenne de cuivre. En outre, le film isolant anti-hygroscopique ne retient pas l'humidité atmosphérique. Or, c'est précisément l'humidité incorporée dans le papier du circuit magnétique qui rend si longue l'opération de mise à huile.

A vrai dire, si les bobinages sont parfaitement imprégnés, et que le circuit magnétique soit ainsi isolé, l'opération de mise à huile ne comporte plus qu'un séchage — en quelque sorte superficiel — de la partie mécanique, et une dégazéification de l'huile.

Note sur la séparation centrifuge de particules solides au sein d'un liquide.

Nous avons parlé dans l'exposé qui précède de la limite du pouvoir séparateur d'un centrifuge.

On peut se rendre compte par le calcul ci-après de sa valeur approximative.

Considérons par exemple un Centrifuge classique à bol cylindrique, qui permet l'emploi des champs les plus intenses.

Soient r_0 et r_1 les rayons intérieur et extérieur de l'anneau d'huile en mouvement.

Pour que toutes les particules de même espèce soient évacuées lors de l'opération, il faut qu'une particule quelconque de cette espèce étant prise à l'entrée au point P sur la circonférence de rayon r_0, se trouve à la sortie, en un point P′ sur la circonférence de rayon r_1.

Il faut donc que le temps t que met une particule à passer de r_0 à r_1 soit au plus égal au temps T que met l'huile à passer du niveau d'entrée A au niveau de sortie B.

Dans le champ centrifuge d'intensité

$$I = \omega^2 r,$$

une particule sphérique de diamètre Φ et de masse M, plongée dans un

liquide de masse m (m étant la masse qui correspond au volume de la sphère de diamètre Φ), est sollicitée par une force qui a pour expression :

$$F = (M - m)\omega^2 r \quad \text{(en dynes)},$$

(en négligeant l'action gravifique).

La réaction du liquide est une force de même direction mais dirigée en sens inverse.

Supposons, d'après Stockes, que cette force ait pour expression :

$$R = 3\pi\eta\Phi V.$$

Où : V est la vitesse de la particule, (en cm/seconde)
et : η la viscosité du liquide, (en unité CGS).

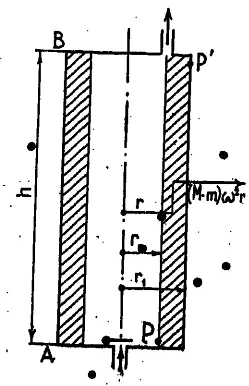


Fig. 10.

Lorsque les 2 forces F et R sont égales, la vitesse limite est atteinte et demeure constante. On a alors :

$$(M - m)\omega^2 r = 3\pi\eta\Phi V.$$

D'où :

$$V = \frac{(M - m)\omega^2 r}{3\pi\Phi\eta}.$$

Tenant compte de ce que :

$$(M - m) = \frac{\pi\Phi^3}{6}(D - d) \quad \text{(en grammes-masse)}.$$

Où : D et d sont les densités respectives de la particule et du liquide, on tire :

$$V = \frac{1}{18}\left(\frac{D - d}{\eta}\right)\Phi^2\omega^2 r \quad \text{(en centimètres par seconde)}.$$

Cette relation peut aussi s'écrire

$$V = \frac{dr}{dt}.$$

Où : dr est le déplacement de la particule sur sa trajectoire radiale, dans le temps dt.

On déduit de ces deux relations

$$dt = \frac{18\eta}{(D-d)\omega^2\Phi^2 r} \cdot dr.$$

D'où :

$$\int_{r_0}^{r_1} dt = t = \frac{18\eta}{(D-d)\omega^2\Phi^2} \text{Log}_e \frac{r_1}{ro}.$$

Tenant compte que $\omega = 2\pi N$, on peut écrire :

$$t = \frac{18\eta}{(D-d)4\pi^2 N^2\Phi^2} \text{Log}_e \frac{r_1}{ro}.$$

Ou bien :

$$t = \frac{0{,}455\eta}{(D-d)N^2\Phi^2} \text{Log}_e \frac{r_1}{ro}. \qquad (1)$$

Le temps de passage T d'une particule dans le bol du centrifuge est donné en seconde, par la relation :

$$T = \frac{V}{q}.$$

Où : V est le volume du bol liquide en centimètres-cubes.

Et : q le débit du centrifuge, en centimètres-cubes par seconde.

Pour qu'une particule soit éliminée de l'huile, il faut que l'on ait :

$$t \leqslant T$$

Posant $t = T$ dans la relation (1) on a

$$T = \frac{0{,}455\eta}{(D-d)N^2\Phi^2} \text{Log}_e \frac{r_1}{ro}. \qquad (2)$$

D'où l'on déduit :

$$\Phi^2 = \frac{0.455\eta}{(D-d)N^2 T} \text{Log}_e \frac{r_1}{ro}.$$

$$\Phi = \frac{1}{N}\left[\frac{0{,}455\eta}{(D-d)} \cdot \frac{1}{T} \cdot \text{Log}_e \frac{r_1}{ro}\right]^{\frac{1}{2}}. \qquad (3)$$

On peut aussi déduire de la relation (2) la valeur de la densité des plus légères particules éliminées :

$$D' = d + \left[\frac{1}{T} \times \frac{0.455\eta}{\Phi^2 N^2} \cdot \text{Log}_e \frac{r_1}{ro}\right].$$

Exemple numérique (Système CGS)

Soit un Centrifuge tubulaire ayant les caractéristiques ci-après :
$h = 77$ cm, $r_1 = 5{,}8$ cm, $r_0 = 2{,}4$ cm,
Vitesse = 15 000 t:mn
D'où N = 250 t:s
Q = 15 000 litres par heure
Soit

$$q = \frac{15\,000 \times 10^3}{3\,600} = 417 \text{ cm}^3 : \text{s}.$$

Intensité max du champ

$$I = \omega^2 r = (2\pi \times 250)^2 \times 5{,}8 = 14\,300\,000 \text{ dynes}.$$

Soit une intensité de

$$\frac{14\,300\,000}{981} = 14.600 \text{ fois l'action de la pesanteur}$$

Volume du bol liquide :

$$V = \pi(r_1^2 - r_0^2)h = 6\,700 \text{ cm}.$$

Durée d'exposition au champ centrifuge

$$T = \frac{V}{q} = \frac{6\,700}{417} = 16 \text{ s}:$$

Soit une huile de viscosité
de 0,13 poises
avec $d = 0{,}9$

Ce qui correspond à une huile de disjoncteur normalement souillée, à 50° C.

La grosseur minimum des particules de densité D = 1 qui peuvent être totalement éliminées, se déduit de la relation (3) :

$$\Phi = \frac{1}{250}\left[\frac{0{,}455 \times 0{,}13}{(1 - 0{,}9)} \times \frac{1}{16} \times \text{Log}_e \frac{5{,}8}{2{,}4}\right]^{\frac{1}{2}}.$$

Soit $\Phi > 7 \times 10^{-4}$ cm, ou 7 µ.

Ce type de centrifuge, à champ intense, ne peut donc pas théoriquement enlever toutes les particules dont le diamètre est inférieur à 7µ.

Si nous considérons maintenant un centrifuge à vitesse 6.000 t/mn.
Soit : N' = 100.

$$\Phi' = \Phi \times \frac{N}{N'} = 7 \times \frac{250}{100} > 17\mu.$$

On comprend que dans ces conditions les sphérules d'eau en émulsion et les fines suspensions dont le diamètre descend normalement jusqu'à 0,1 μ, échappent à l'action centrifuge.

Ce résultat théorique, si imparfait qu'il soit, n'est en réalité pas atteint, et la grosseur des particules limites est bien plus élevée, comme on peut s'en rendre aisément compte à l'examen microscopique.

Notre calcul, en effet, ne tient pas compte :

— de l'attraction entre particules,

— des mouvements browniens dont la vitesse peut atteindre une valeur de même ordre de grandeur que la vitesse de précipitation de la particule,

— des remous, surtout dans les appareils tubulaires,

— des vibrations du bol.

En outre, nous faisons observer que la vitesse de la particule a été atteinte instantanément alors qu'elle doit nécessairement passer par une période d'accélération. Le temps t est donc plus grand que ne l'indique le calcul.

Mais la principale cause d'erreur tient à l'inexactitude de la valeur supposée de R (force opposée par le liquide au déplacement de la particule).

Nous avons supposé, d'après STOCKES, que cette réaction variait linéairement avec V. L'approximation peut-être suffisante pour de très faibles vitesses, comme celle de la décantation. Mais elle est inadmissible pour les vitesses beaucoup plus élevées obtenues dans le champ centrifuge.

Il est probable que l'on a en réalité :

$$R_1 = K\Phi^m V^n d\eta,$$

d est la densité du fluide où se déplace la particule de diamètre Φ et

où $$2 > m \geqslant 1 \text{ et } 2 > n > 1$$

Avec la valeur de R donnée par STOCKES, on trouve que le rapport :

$$\frac{\text{Vitesse de précipitation centrifuge}}{\text{Vitesse de décantation}} = \frac{\omega^2 r}{g}.$$

qui est précisément le rapport des intensités des deux champs.

Le bon sens indique qu'un tel résultat ne pourrait être obtenu que dans le vide. Dans un milieu pondérable, le rapport doit être plus faible.

Si l'on suppose que :

$$R_1 = K\Phi V^2 d\eta.$$

On trouve que :

$$\frac{\text{Vitesse de précipitation centrifuge}}{\text{Vitesse de décantation}} = \sqrt{\frac{\omega^2 r}{g}}.$$

Dans notre exemple numérique le rapport des vitesses serait donc :

$$\sqrt{14\,600} = 121.$$

et non pas = 14 600 comme on pourrait le croire, et comme notre calcul le supposait.

La vraie valeur de la vitesse est comprise entre ces deux limites.

En réalité, dans l'exemple concret cité plus haut, le diamètre limite des particules séparées semble être — d'après le microscope — supérieur à 30 ou 40 μ.

OBSERVATIONS NOUVELLES OU PEU CONNUES D'ÉCLAIRS GLOBULAIRES [1]

par E. MATHIAS

Correspondant de l'Institut, Doyen honoraire.

L'ordre qui nous a semblé le plus naturel pour l'utilisation des observations qui étaient à notre disposition est le suivant :

Observations qui prouvent l'objectivité du phénomène de l'éclair globulaire. La fréquence de son déplacement horizontal à peu de distance au-dessus de la surface du sol. L'explosion par choc, laquelle peut se faire en plusieurs fois. Les foudres habillées. La désélectrisation des foudres globulaires par contact avec un corps au potentiel zéro. Les phénomènes qui dépendent de la tension superficielle de la matière fulminante et la sortie accidentelle de l'éclair globulaire de certains appareils électriques.

Les faits mis le plus souvent en évidence sont : la chute de la matière fulminante dans l'air, l'augmentation de son volume lorsqu'elle se décompose ; l'absence de traces laissées par la matière fulminante ; les phénomènes de caléfaction auxquels elle donne lieu ; la parfaite transparence de la matière fulminante pure ; sa fluorescence ; la naissance des formes cylindrique et serpentine lorsque les impuretés de la matière fulminante deviennent massives et l'audition du tonnerre d'Arago après l'arrivée de la foudre globulaire.

L'attention du monde savant et des personnes cultivées a été attirée récemment par des observations répétées d'éclairs globulaires faites dans des conditions telles que l'objectivité du phénomène ne pouvait être mise en doute. Ces observations en ont rappelé de plus anciennes qui méritaient d'être connues.

Nous avons groupé, dans l'ordre qui nous a paru le plus logique, un certain nombre de ces observations pour faire apparaître une conclusion nette, en harmonie avec ce que nous savons déjà. Parfois, nous avons utilisé une observation ancienne peu connue mettant en évidence une particularité nouvelle.

Dans ce qui suit, nous utiliserons fréquemment un dossier inédit, mis gracieusement à notre disposition par notre ami M. HOULLEVIGUE, professeur à la Faculté des Sciences de Marseille, et emprunté aux observations et aux souvenirs des lecteurs du « *Temps* » qui suivent ses admirables *Causeries scientifiques.*

---

(1) Communication présentée à la séance mensuelle de la Société française des Electriciens du mercredi 4 mai 1932.

I — Foudres observées simultanément par une nombreuse assistance.

1°. — « En 1875, alors que j'étais au collège de Cluny, par un violent orage, une *boule de feu*, de la grosseur d'un fromage de Hollande, entra par le vasistas ouvert de l'une des fenêtres de la salle d'étude dans laquelle je me trouvais avec mes camarades. Cette boule *traversa lentement la salle en descendant obliquement* et sortit par la porte ouverte qui se trouvait en face de la porte par laquelle elle était entrée. Grâce à la présence d'esprit du maître d'étude, qui recommanda de ne pas bouger, il n'y eut aucun accident à déplorer. *La boule de feu alla se résorber dans la cour du collège* (voir § VI).

2°. — Fin juillet 1922, je me trouvais à bord du *SS. Kachgar* de la Compagnie P. et O., en route pour Marseille. Arrivés à la hauteur de la Crète, nous fûmes assaillis par un fort orage. La foudre tomba sur le mât d'artimon, et, à ce moment précis, les passagers virent une *boule de feu* qui filait à contre-bord le long du flanc babord du bateau et alla se perdre dans le sillage du navire... » [1].

Les deux observations mettent en évidence, l'une et l'autre, la *chute de la matière fulminante* qui, dans la première, descend obliquement du vasistas d'entrée pour aller se résorber dans la cour du collège et, dans la seconde, descend du mât d'artimon jusque dans le sillage du navire.

II. — Foudres globulaires se déplaçant horizontalement à peu de mètres au-dessus de la surface de la terre.

W. M. Thornton écrivait en 1911, au sujet de l'éclair en boule : d'après les souvenirs éparpillés de son apparence, les faits suivants peuvent être considérés comme établis. Il se présente comme une boule lumineuse bleue [2], se produisant après les décharges d'éclair de grande intensité et soit *tombant lentement des nuages* ou *se mouvant horizontalement* à quelques pieds au-dessus de la surface de la terre... » [3].

L'observation suivante, due à M. C. Matignon, membre de l'Institut, justifie l'assertion de W. Thornton.

---

(1) Dossier Houllevigue. Lettre du 4 juin 1925, de M. P. de Saint-Pierre de Montaigle, ingénieur du Canal de Suez en retraite.

(2) Cette couleur est due à l'impureté *soufre*; elle n'est pas spécifique de la matière fulminante.

(3) W. M. Thornton, *Phil. Mag.*, [6], t. 21, p. 631 ; 1911.

3°. — « Il y a quelques années, peut-être en 1927, vers la fin de septembre, je circulais dans la rue de mon village, à *Saint-Maurice-aux-riches-Hommes* (Yonne), lorsque j'aperçus un globe lumineux ; je m'arrêtai pour l'observer, mais il disparut bientôt derrière des arbres et des habitations.

L'observation fut faite au moment du coucher du soleil par un temps calme. *La boule se déplaçait horizontalement à une hauteur au-dessus du sol d'environ 3 mètres* et à une distance de moi d'environ 80 mètres. La boule, jugée être à cette distance, se présentait de la grosseur du poing. Sa vitesse pouvait se rapprocher de celle du cheval au trot ; mais je donne cette évaluation sans la garantir.

Elle se déplaçait, autant que j'ai pu en juger pendant le temps assez court de l'observation, dans la direction nord-sud et, au moment où je l'observai, j'avais le soleil exactement derrière moi... *La teinte était d'un bleu légèrement vert...* » (1).

Cette observation d'un chimiste éminent prouve qu'on a affaire à une matière fulminante *jaune pâle* contenant du soufre, la superposition du jaune pâle et du bleu donnant du bleu légèrement vert. On sait que les foudres globulaires jaunes sont plutôt rares (2), ce qui donne beaucoup d'intérêt au récit. En voici un autre :

4°. — « ... Le phénomène a été observé par M. H. BOUCART, industriel, à Quetwiller, au mois de janvier 1888, vers 5 heures de l'après-midi, depuis un train en marche, dans la plaine entre Bollwiller et Mulhouse, M. BOUCART me dit avoir vu tout d'un coup (sans avoir assisté à la formation de la boule) *une boule de feu* à environ 100 m du train, *à une hauteur de* 1 *m environ au-dessus du sol*. La sphère lumineuse avait un diamètre de 15 à 20 cm. La couleur était à peu près celle d'une orange. Son éclat lumineux n'était pas très vif. *La sphère se déplaçait d'un mouvement lent* et à peu près en ligne droite, avec des variations de niveau, tombant presque sur le sol puis se relevant. La sphère, s'étant approchée à 2 ou 3 m d'un arbre, a commencé à tourner autour de cet arbre, a pris un mouvement de plus en plus rapide, et a éclaté en coupant l'arbre en deux. L'éclatement de la sphère a été accompagné d'une très forte lueur. Le phénomène décrit s'était produit au cours d'un orage sans pluie, durant déjà depuis une demi-heure environ et d'une violence assez médiocre... » (3).

---

(1) Lettre adressée à l'auteur, le 29 octobre 1931.

(2) E. MATHIAS, La Matière fulminante, *Ann. des P. T. T.*, juillet 1928, § 11, p. 20, en haut.

(3) Dossier HOULLEVIGUE. Lettre du 2 juin 1925, de M. F. QUIEVREUX, ingénieur civil des Mines, poste Bollwiller (Haut-Rhin).

La viscosité de l'air et son adhérence pour les corps solides (ici l'écorce de l'arbre) sont bien connues. Si le mouvement rectiligne de la boule avait été très rapide, l'arbre ne l'aurait pas *captée* ; le mouvement étant lent, l'air a tourné lentement autour de l'arbre, entraînant avec lui la foudre globulaire. La matière fulminante se refroidissant de plus en plus, s'est décomposée de plus en plus vite, accélérant progressivement le mouvement de rotation des couches d'air autour de l'arbre jusqu'au moment de l'explosion finale, qui coupe l'arbre en deux avec une très forte lueur.

On a affaire ici à un globe assez gros (R voisin de 10 cm), de volume approximatif 4 000 cm^3, ce qui donne une énergie intérieure de

$$4\,000 \times 2\,860 \text{ kgm} > 11.10^6 \text{ kgm}$$

beaucoup plus que suffisante pour expliquer les effets observés. Si l'on se rappelle que l'éclair sphérique de Bitschwiller, vu par Jean Koechlin, s'était arrêté à 2 mètres du sol, on voit, sans chercher à multiplier les exemples, que les faits justifient bien la remarque de W. THORNTON.

III. — Explosion par choc.

Dans une publication antérieure (1), nous avons attiré l'attention sur le phénomène très important de *l'explosion par choc*, qui se produit d'autant plus facilement que la température de la matière fulminante est plus basse et par suite la couleur plus voisine du *rouge sombre*. Voici deux nouveaux exemples.

5°. — « Un violent orage, accompagné d'une pluie diluvienne, s'est déclaré lundi dernier après la séance de l'Académie... Il était environ 15 heures 40 ; le soleil brillait ; au quatrième étage, mon domestique Auguste Barridas... travaillait assis devant une fenêtre donnant sur la cour ; une vive lueur lui fait lever les yeux et il aperçoit dans le ciel une *boule de feu rouge*, d'une trentaine de centimètres de diamètre, *tombant obliquement* au-dessus de la cour dans la direction NE ; à une dizaine de mètres de distance *il la voit heurter* au-dessus du toit *le coin du massif de cheminées* ; elle éclate « à la manière d'un obus de 75 » m'a-t-il dit, lançant une pluie de feu *et un fort déplacement d'air rejette brusquement en arrière l'observateur effrayé...* » (2).

Cette intéressante observation montre trois choses : (*a*) la *chute de la foudre globulaire* sous l'influence de la pesanteur, déjà vue dans

(1) E. MATHIAS, La Matière fulminante (suite). Modes de décomposition, etc. *Ann. des P. T. T.*, avril 1929, § 14.
(2) H. DOUVILLÉ, *C. R.*, t. 193, p. 379 ; 31 août 1931.

le § 1 ; (*b*) le phénomène de *l'explosion par choc* d'une foudre rouge, et (*c*) le fort déplacement d'air, qui explique beaucoup de faits anciennement observés mais incompris et qui provient de *l'augmentation de volume de la matière fulminante se décomposant subitement.*

Voici une autre observation, peut-être un peu moins nette.

6°. — « Le (cas) remonte à l'époque de mon enfance (vers 1860). Il s'est produit à Parmilieu (Isère), dans la propriété de mes parents, à une centaine de mètres des bâtiments d'exploitation et en plein champ, au lieu dit « La Verschère ». Il a eu pour témoin le jardinier, qui en avait été tout éberlué, et jurait qu'il avait vu le « *tonnerre de pierre* » (cette appellation sans doute à cause de la forme globulaire) *éclater en touchant le sol.* Un entonnoir de 0,25 m de profondeur et de 0,50 m de diamètre était visible en cet endroit. Le phénomène s'est produit au cours d'un orage. » (1).

L'éclair globulaire touchant le sol avec vitesse, il semble bien qu'on ait le droit d'attribuer l'explosion au choc.

IV. — Foudres à éclatements multiples.

Ce cas est intéressant parce que Arago ne croyait pas qu'une même foudre globulaire pût avoir plusieurs éclatements successifs, le premier devant produire son explosion totale. On en trouvera la preuve en se reportant à l'observation du *globe de feu*, de la grosseur du poing, qui apparaît tout à coup à la hauteur de la figure des révérends Wainhouse et Pitcairn et à environ un pied de distance, dans le presbytère de Steeple-Aston (1772). Ce globe était entouré d'une fumée noire. En éclatant, il fit un bruit comparable à celui d'un grand nombre de pièces de canon qui partiraient à la fois, etc... (2).

Et il ajoute à la fin : « je dois dire, quoique cette circonstance ait peu de liaison avec l'objet de ce chapitre, que M. Pitcairn prétendit avoir vu le *Globe de feu* dans l'appartement une ou deux secondes *après* qu'il s'était senti foudroyé. » *Le premier éclatement n'avait donc pas détruit la foudre globulaire comme le croyait* Arago. Voici un autre exemple du même phénomène.

7°. — « C'était au mois de juin 1884, par une journée très chaude ; de petits nuages noirs apparaissaient à l'horizon. Je me trouvais à ce moment dans la plaine qui forme la commune de Sansais. Soudain,

(1) Dossier Houllevigue. Lettre du 30 avril 1925, de M. Charles de Chavonnes, gouverneur honoraire des Colonies.
(2) F. Arago, *Notices scientifiques*, t. I, p. 44.

un coup de tonnerre, sans roulements antérieurs, éclate comme une série de pétards d'un feu d'artifice. Peu après, *un second coup de tonnerre*, semblable au premier. A ce moment, je rencontre un de mes amis qui venait sur la route en sens opposé. Il m'aborde en disant : « Ah ! mon cher VANDER, je viens d'avoir grand'peur... Tu vois là-bas ce gros ormeau près de la mare de la métairie de Cubagne. En passant, *j'ai vu sortir au pied de l'arbre une fumée grise*. Je m'avance pour éteindre ce qui me semble un commencement d'incendie. Au moment où j'allais mettre le pied sur les broussailles qui brûlaient, j'aperçois *une boule de feu qui éclate et me renverse*. Je n'ai ressenti aucun mal, mais je ne suis pas encore remis de l'émotion que m'a causé cette explosion que tu as dû entendre... (1).

Au *deuxième* éclatement seulement se produit l'explosion finale ; *l'augmentation de volume produite par la matière fulminante se décomposant subitement* renverse cette fois l'observateur qui, dans le cas de la foudre du § III, avait seulement été — à cause de la distance — *rejeté brusquement en arrière*.

Voici un cas plus curieux encore et plus rare.

8°. — « En juin 1914, vers 3 ou 4 heures de l'après-midi, un orage d'une violence exceptionnelle éclatait sur Paris (c'était le jour où une excavation fut causée par la pluie, place Saint-Augustin, telle qu'un taximètre s'y engloutit). Je me trouvais sous les tentes de l'épicerie de l'Hôtel *Terminus* près de la gare Saint-Lazare, à regarder la pluie torrentielle tomber, lorsqu'une *boule de feu*, parfaitement ronde, d'une couleur jaune dorée, d'une vingtaine de centimètres de diamètre, *descendit du ciel* et *éclata* sur un des rails du tramway à 5 ou 6 mètres de moi. Cette boule disparaissait ensuite en remontant au-dessus des immeubles de la rue de Rome, *puis revenait éclater à nouveau devant moi*, pour remonter de la même façon, et cela à 3 ou 4 reprises (après quoi elle disparut) et toujours au même endroit.

L'orage s'étant calmé, j'allai voir le *point de choc* sur le rail et fus tout surpris de constater que ces 3 ou 4 explosions formidables n'y avaient laissé aucune trace. » (2).

Ici, nous sommes en présence de *plusieurs éclatements successifs par choc* (voir le § III) qui n'occasionnent que des rebondissements.

Quant à l'absence de trace sur le rail, on sait que, la matière ful-

(1) A. F. A. S., Congrès de Saint-Etienne, séance du 7 août 1897. Communication de M. SIEUR, professeur de physique au Lycée de Niort. Le récit est de M. VANDER-CRUYSSON, ancien percepteur à Fénioux, puis à Niort.

(2) J. IMBRECQ, *C. R.*, t. 193, p. 949 ; 16 novembre 1931.

minante étant incandescente, *il y a caléfaction*, donc aucun contact avec le corps froid qu'est le rail.

Comme au § I, on a ici des exemples répétés de chute de la foudre globulaire sous l'action de la pesanteur.

V. — Observation de foudre habillée.

9°. — « C'était vers 1864 ou 65. J'étais en vacances à Amiens, chez mes parents habitant une maison située devant un assez vaste horizon de cultures maraîchères. Un après-midi du mois d'août se produisit un violent orage ; la pluie commençait à tomber, précédant un coup de tonnerre. Je vis en face de moi, dans le ciel, une *boule de feu* dont le diamètre m'a semblé un peu moindre de celui de la lune en son plein ; elle avait cette forme avec une déchirure.

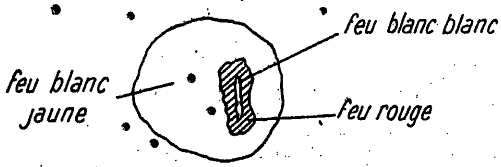


Fig. 1.

(Le corps était opaque).

Ebranlé par le bruit qui suivit cette apparition, je rentrai dans l'intérieur de la maison. J'appris le lendemain que la foudre, dans cette forme, avait tué un jardinier travaillant dans sa propriété » (1).

On a affaire, dans cette belle observation, à un cas rarissime de foudre habillée blanche, pour lequel nous avons dit antérieurement : « Avec les foudres grises ou blanches, le vêtement collant peut être assez mince ou assez transparent pour transmettre partiellement la lumière intérieure : *si le vêtement collant est troué par endroits, les déchirures laissent entrevoir la matière fulminante incandescente.* » (2). Ici, la matière fulminante intérieure est rouge ; le vêtement collant est *blanc jaune* ; le fragment du vêtement intérieur à la déchirure paraît *blanc blanc* probablement par contraste, étant entouré de toute part de matière fulminante rouge.

---

(1) Dossier Houllevigue. Lettre du 6 juillet 1925, de M. Edwards Gontier, antiquaire, ex-conservateur du musée de Saint-Malo, 3, rue Toullier.
(2) E. Mathias, *La foudre globulaire*, voir ce *Bulletin*, déc. 1930, p. 1293, § 14.

VI. — Foudres globulaires s'éteignant au contact d'un corps au potentiel zéro.

La propriété des foudres sphériques électrisées de se désélectriser au contact d'un corps au potentiel zéro et, une fois désélectrisées, de se décomposer instantanément, de *s'éteindre* en un mot, est capitale au point de vue du danger qu'elles présentent tant qu'elles existent à proximité d'un être vivant.

L'idéal du corps au potentiel zéro, c'est la surface du sol, quand elle n'est pas sous l'influence d'un puissant nuage positif ou négatif et qu'il s'agit de terre plus ou moins meuble, et non d'un énorme rocher constitué par une substance plus ou moins isolante.

Voici des exemples montrant des foudres globulaires *s'éteignant en s'enfonçant dans le sol.*

10°. — « Je me souviens fort bien qu'étant installé, en 1909, à une petite table sur la terrasse du Pavillon de l'Elysée où j'étais allé dîner, nous fûmes surpris par un orage d'une violence telle qu'il faillit crever la banne protectrice sous laquelle nous étions abrités. Tout à coup, une formidable détonation fulgurante me fit sursauter et une *boule de feu*, d'un bleu pâle violacé d'une couleur rappelant celle de l'éclairage au mercure, boule ayant la forme d'un globe parfait de la grosseur du poing, vint s'abattre à environ six mètres de moi, et *disparut en s'enfonçant dans le sol du jardin.* » (1).

Nous avions déjà vu un exemple analogue § I, la boule de feu du Collège de Cluny *allant se résorber dans la cour du collège.*

Une conduite d'eau métallique en contact intime avec la terre est aussi au potentiel zéro. Une foudre globulaire doit donc se désélectriser et s'éteindre à son contact suffisamment prolongé.

11°. — « ... L'hiver passé (1925), un soir à 20 h 30 environ, ma cuisinière Rachel S. était occupée à laver la vaisselle devant l'évier (SW de la maison) de la cuisine située au rez-de-chaussée (NW de la maison). A deux mètres d'elle, se trouvait la femme de chambre Berthe R. tournée vers sa compagne. De sa place, Berthe R. pouvait voir distinctement dans la cour à l'ouest. Derrière elle, au sud de la pièce, est la porte communiquant avec l'intérieur de la maison. Cette porte était fermée. Le temps était lourd et il pleuvait. La cuisinière tendait la main droite pour saisir une petite brosse dans un récep-

---

(1) Dossier HOULLEVIGUE. Lettre du 2 mai 1925, de M. P. S., ancien aide-préparateur de laboratoire (physique et chimie).

tacle en fil de fer galvanisé qu'on suspend au mur au-dessus de l'évier pour y mettre brosses et savon. Le réceptacle en question est à 1,30 m au-dessus du sol et se trouvait à une distance d'environ 50 cm droit devant l'épaule de Rachel S. Ce réceptacle touche par sa partie inférieure au tuyau d'eau venant du réservoir d'eau placé aux combles, deux étages plus haut. La porte entr'ouverte donnant sur la cour est à 1 m derrière Rachel S. Cette dernière se souvient qu'en saisissant la brosse elle avait la main appuyée sur le réceptacle en fil de fer. Tout à coup, Rachel S. vit distinctement une *boule de feu* émettant une lueur bleue vive *glisser tout le long de son bras, sur le bras de l'épaule au revers de la main et disparaître dans le tuyau d'eau, au coin du mur.* La jeune femme était tellement stupéfaite et la chose se passa tellement rapidement qu'elle n'eut pas le temps d'être effrayée. Elle ne ressentit, du reste, pas le moindre malaise. *Elle sentit comme un courant d'air* — une sensation de fraîcheur — comme si un courant d'air était venu de la porte entr'ouverte ; *de chaleur, aucun vestige, ni de choc électrique.*

La femme de chambre avait vu la boule entrer par la porte entr'ouverte et flotter, *en descendant légèrement*, avec une vitesse d'environ 2 mètres par seconde, vers l'épaule de Rachel, Berthe vit distinctement comme la boule, de la grosseur d'une orange, glissait sur le bras de sa compagne *et disparut sans bruit dans le coin du mur.* Elle fut effrayée de voir Rachel dans cette lumière bleue ; elle n'eut que le temps de crier : « Eh ! qu'est-ce que tu as ! » et se sauva dans le corridor. *Berthe se souvient qu'après que la boule avait disparu, il y avait eu un coup de tonnerre.* » (1).

12°. — « Mon épouse et ma fille cadette étaient en même temps assises dans une pièce du premier étage située au coin NE de la maison. Mon épouse vit distinctement *une boule gazeuse transparente*, de la grosseur d'une petite orange, émettant une lueur douce bleuâtre, pas du tout vive, qui flottait tranquillement environ une seconde à une trentaine de centimètres au-dessus du radiateur (2). Elle eut le temps de dire : « regarde donc cette boule » *et l'objet disparut subitement et sans bruit.* Une seconde après, il y eut, très haut et très loin dans l'atmosphère, *comme un formidable coup de tonnerre.*

(1) Dossier Houllevigue. Lettre du 10 mai 1925, de M. Emile Bucher, Ph. D. (Université de Berne), ancien élève de l'Ecole Polytechnique de Zurich, section de chimie.

(2) Le radiateur est adossé au mur, au sud de la pièce, vers l'ouest. Détail à noter : *il est relié* au réservoir d'eau aux combles par la tuyauterie *et à la terre* par la chaudière métallique.

Mon épouse, qui ne fut aucunement effrayée, *fut frappée de la transparence de la boule. Elle vit clairement le papier peint à travers celle-ci. La foudre ne semblait pas émettre une lumière elle-même. Elle semblait plutôt être éclairée.* Elle rappelait un peu une très grosse aigue-marine bien éclairée.

Ma fillette avait vu la boule entrer par la fenêtre entr'ouverte au nord et se diriger horizontalement vers la lampe électrique suspendue au-dessus de sa tête. Quand elle tourna la tête du côté indiqué par sa mère, la boule avait disparu....

Rachel et les trois autres témoins assurent qu'il n'y a pas eu d'odeur... » (1).

Dans ce long récit, il y a deux observations distinctes : 11 et 12, présentant d'ailleurs un très grand parallélisme dans les détails.

Au rez-de-chaussée, comme au premier étage, une boule *venue du ciel* est entrée par la porte entr'ouverte ou par la fenêtre. Ces deux boules étaient *bleues*, de la grosseur d'une orange moyenne ou petite. Celle du rez-de-chaussée avait une allure modérée, celle du premier une allure très vive. Elles étaient *transparentes* toutes les deux, dénuées d'odeur l'une et l'autre, *et se sont éteintes pareillement sans bruit*, la première en touchant le tuyau d'eau relié au réservoir des combles et à la terre, la seconde en touchant le radiateur relié à la terre.

Plusieurs particularités sont à relever avec soin. Dans les deux cas, *on a entendu le tonnerre après l'extinction sans bruit.* Ce tonnerre entendu était ce que nous avons appelé « le tonnerre d'Arago », celui qui correspond à la rentrée de l'air dans le vide produit par la condensation de l'air qui crée la matière fulminante des deux foudres globulaires. Or, ce tonnerre d'Arago a voyagé avec la vitesse du son, tandis que l'éclair qui a apporté les deux boules à proximité a voyagé avec une vitesse comparable à celle de la lumière. On retrouve donc ici un phénomène sur lequel, à plusieurs reprises, nous avons attiré l'attention, notamment dans la discussion des coups de foudre si curieux d'Amiens et de Pontgibaud (2).

La matière fulminante est souillée, dans les deux cas, par la présence du soufre, puisqu'elles sont *bleues* ; l'impureté devait être faible, surtout dans le second cas, la transparence de la matière étant telle que Madame Bucher vit clairement le papier peint au travers de celle-ci. Autre détail très important. En glissant tout le long du bras

(1) Dossier Houllevigue. Il s'agit ici de la seconde partie de la lettre de M. Bucher, coupée en deux pour la clarté du récit.

(2) E. Mathias, La Foudre, *Ann. des P. T. T.*, novembre 1927, p. 31.

de Rachel S., de l'épaule au revers de la main droite, la première boule bleue *ne produisit aucune sensation de chaleur* ; c'était donc ce que l'on peut appeler un globe « froid ». Or, l'explication que nous en avons donnée [1] exige qu'il s'agisse d'une foudre impure (et c'est bien le cas ici) émettant autour d'elle une couche de vapeur d'eau qui arrête partiellement ou totalement le rayonnement calorifique de la matière fulminante.

Une dernière remarque est que les deux foudres bleues, qui contiennent du souffre, n'ont cependant présenté aucune odeur. Nous avons vu que la quantité de ce corps devait être très faible : de plus, la sphère est la figure géométrique qui, pour une masse donnée, présente la plus petite surface libre. Or, il y a des foudres impures dont l'odeur ne s'accuse pas, tant qu'elles sont sous la forme globulaire, tandis qu'elle devient évidente quand la matière fulminante est résolue en gaz capable d'infecter un vaste édifice.

VII. — Observations montrant la transformation directe de l'éclair linéaire en foudre sphérique.

Voici une observation ancienne à mettre à côté de celle de Jean Koechlin, *qu'elle complète.*

13°. — « ... J'ai eu, une fois dans ma vie, la chance de voir tomber le tonnerre en boule. C'était en 1871, dans une étroite vallée des Vosges, au pied du Königsburg. La boule de feu était brillante comme du fer en fusion, *elle tomba relativement lentement*, car j'eus le temps de compter presque trois. *Ce n'est qu'aux deux tiers du chemin du nuage au sol que la boule se forma*, deux fois plus grosse qu'une boule à jouer ordinaire. *Au sortir du nuage, ce n'était qu'un éclair ordinaire, tout droit, excessivement rapide.* La boule tomba sur un chêne qui se trouvait au fond du vallon, *et ce n'est qu'en touchant l'arbre que la foudre éclata* avec un bruit excessivement retentissant... » [2].

Dans cette très belle observation, on voit la chute de la matière fulminante ; *l'éclair tombe tout d'une pièce* et ce n'est que quand le refroidissement est suffisant (aux deux tiers de la trajectoire) que la tension superficielle, ayant acquis une intensité convenable, peut rétracter la surface extérieure de la matière fulminante et lui donner sensiblement l'aire minima sphérique. Conformément au § III, le con-

---

(1) E. Mathias, *La Matière fulminante* (fin), Caléfaction, etc., *loc. cit.* § 6.
(2) C. Jolivet, Eclair en boule, *Cosmos*, t. 31, p. 167-168 ; 1895.

tact violent avec le chêne du fond du vallon donne *l'explosion par choc.*

Voici maintenant deux observations dans lesquelles on voit la forme sphérique liée à l'éclair linéaire générateur.

14°. — « ... J'étais au mois d'août au Sappey, près de Grenoble, à environ 800 mètres d'altitude... De la fenêtre de l'hôtel, située au 1er étage, je m'assurais que je pouvais partir en promenade avec mes enfants... Subitement, sans aucun bruit, une lumière très blanche se détacha du sommet de la montagne de Chamachambe, qui domine le Sappey sur la droite, et dessina, *plus lentement qu'un éclair ordinaire*, un long ruban lumineux, très droit, qui descendit (presque) horizontalement en parcourant environ un kilomètre et demi et vint se terminer dans un champ à environ 10 mètres sous mes fenêtres.

A l'extrémité de cette ligne, je vis une boule très blanche et floconneuse, un peu plus grosse qu'une tête d'homme, qui s'immobilisa une seconde, prit une forme ovoïde, éclata et disparut à environ 70 cm du sol, avec un bruit impressionnant.

Bien que très rapproché du point d'éclatement, *je ne perçus aucune odeur.* A l'endroit où avait eu lieu l'éclatement, la foudre n'avait laissé aucune trace, *même sur les herbes.* » (1).

On voit, ici encore, pendant la chute de la matière fulminante, la formation de la boule à l'extrémité de l'éclair linéaire, là où, par refroidissement au contact de l'air, la température est la plus basse et la tension superficielle la plus grande.

L'absence de trace, *même sur les herbes*, est un phénomène de *caléfaction* dont on retrouve l'équivalent dans les observations antérieures (2).

L'observation suivante décrit des phénomènes presque identiques.

15°. — « J'habite Cagnes-sur-Mer, au flanc d'un coteau d'où, dans la direction moyenne et dans le sens Nord-Sud, j'ai pour horizon la mer, Antibes et son cap. A vol d'oiseau, je suis à 9 km de Fort-Carré d'Antibes.

Au cours d'un violent orage, le lundi 25 mai dernier (1925), vers 19 heures, j'ai observé dans la direction de Fort-Carré, une succession rapide de nombreux éclairs se produisant *simultanément* par groupes de *deux* ou de *trois*, toujours de directions parallèles et de

(1) Dossier HOULLEVIGUE. Lettre du 24 mai 1925 de M. LACROIX, 2, place de la Bourse, Paris.

(2) E. MATHIAS, La Matière fulminante (fin), Caléfaction. *Ann. des P. T. T.*, déc. 1929, p. 10-11.

même sens, ayant leur origine à mon zénith et leur aboutissement — en perspective cavalière — au Fort-Carré. Parmi cette série d'éclairs doubles ou triples, j'ai observé coup sur coup et en moins de cinq minutes peut-être, les trois phénomènes suivants :

1°) Un groupe de 3 éclairs, dont deux se sont terminés simultanément, peu au-dessus de l'horizon, *chacun par un éclair en boule* visible pour moi pendant deux ou trois secondes.

2°) Même phénomène : deux éclairs *dont un terminé en boule.*

3°) Même phénomène que 1°) : trois éclairs, *deux boules.*

A ce moment, la foudre étant tombée dans une propriété voisine de la mienne, j'ai dû cesser mes observations, auxquelles je puis cependant ajouter les remarques ci-après :

Dans la brume causée par la violence de la rafale de pluie, les globes me sont apparus sphériques, *avec contours dégradés et flous, diamètres sensiblement plus petits que celui de la pleine lune.*.

Lumière *vive*, malgré la distance et bien que tamisée par le nuage de pluie. Apparition et disparition dans un mouvement lent et souple. » (1)

Les globes devaient être de dimensions énormes, car si on admet pour leur diamètre apparent moyen les deux tiers de celui de la pleine lune, c'est-à-dire

$$20' = \frac{20 \times 3}{10\,000} = \frac{6}{1\,000} \text{ radian}$$

on trouve, pour leur diamètre réel, 6 m si leur point de chute a été à 1 km et 3 m s'il s'est produit à 500 m.

« L'absence de contour précis des globes s'explique, étant donné qu'il pleuvait à verse, par les phénomènes de réfraction et de réflexion totale de la lumière à travers la pluie. » (2).

VIII. — Diminution de la tension superficielle par absorption d'une impureté métallique.

16°. — « ... Vers l'année 1885... j'exploitais une grande blanchisserie dans le département du Nord. Il était environ 4 heures de l'après-midi et un violent orage, accompagné d'une pluie diluvienne, sévissait au-dessus de l'usine. J'étais rentré dans mon bureau et regardais... Tout-à-coup, je vis passer devant moi, à environ 1,50 m du sol, un *globe très lumineux*, qui se dirigeait vers ma gauche, avec

(1) Dossier Houllevigue. Lettre du 12 juin 1925 du capitaine d'artillerie Braun.
(2) E. Mathias, La Matière fulminante, *Ann. des P. T. T.*, juillet 1928, § 19, exemple *b*.

une vitesse que je jugeai très modérée. Je ne puis mieux le comparer qu'à un *traversin*, formé d'une matière *éblouissante*, et qui mesurait environ 1 m à 1,50 m de long sur une épaisseur de 0,15 m à 0,20 m. *Il s'écoula un temps très appréciable entre l'apparition de ce météore et l'audition d'un formidable coup de tonnerre*. L'orage s'étant apaisé assez rapidement, je sortis pour me livrer à une enquête sur le phénomène auquel je venais d'assister...

A l'une des extrémités de l'usine se trouvait la chambre des générateurs dont une porte donnait sur le dehors. Cette porte servait au déchargement du charbon. C'est par là que la foudre s'introduisit... l'usine était desservie par un *chemin de fer* qui s'étendait jusqu'aux prairies destinées à l'étendage des toiles. C'est au-dessus de ce chemin de fer que j'avais aperçu le météore dont il suivait la direction. Arrivé à un grand bâtiment dont le 1er étage servait de séchoir, il parut se heurter au mur du bâtiment... Il pénétra par une des nombreuses fenêtres dans l'intérieur du séchoir... et finalement explosa... En examinant les parties par où avait passé le fluide, *je n'ai constaté aucune trace de brûlures... une partie du fluide avait suivi les rails du chemin de fer jusqu'à son extrémité et l'on pouvait constater qu'à chaque raccord des rails une étincelle avait dû jaillir* en projetant au dehors la boue qui s'était formée sous l'influence de la pluie. Mais un phénomène que je n'avais jamais constaté, c'est que *les extrémités de chaque rail étaient rouillées ou semblaient comme usées...* » (1)

— En passant d'un rail à l'autre, grâce à sa très haute température et à l'oxygène qu'elle contient, la matière fulminante oxyde le fer et se souille fortement de ce métal. Cette souillure a deux conséquences : la conséquence optique est un changement de couleur, *qui n'est plus celle du corps noir qui se refroidit*, mais un *blanc éblouissant* caractéristique (2) de l'impureté *fer* à une température relativement basse, comme la couleur *bleue* est caractéristique de l'impureté *soufre*, ces deux impuretés abaissant la tension superficielle de la matière fulminante. Si la proportion de l'impureté est faible, la forme globulaire de la foudre est conservée ; mais si l'impureté est massive, la forme sphérique se transforme de telle sorte que, en chaque point de la surface extérieure, *l'un des deux rayons de courbure principaux devenant infini*, l'impureté *soufre* donne une *forme serpentine*, et

(1) Dossier HOULLEVIGUE. Lettre du 4 mai 192[illegible] de M. E. WARTELLE, à Saint-Germain près Tunis (Régence).

(2) E. MATHIAS, *La Matière fulminante* (suite), Modes de décomposition, § 11, exemple *f*.

l'impureté *fer* une *barre lumineuse*, qualifiée dans le cas présent, par l'observateur, de *traversin*.

Comme dans le § VI, le tonnerre d'Arago se fait entendre seulement après l'arrivée de la foudre globulaire, à l'exemple des foudres d'Amiens et de Pontgibaud et pour la même raison.

Voici un autre cas qui confirme le précédent.

17°. — « Vers 11 heures du soir, le 22 juillet 1894, un violent orage a couvert subitement la ville de Niort. Tous les habitants ont été épouvantés par un coup de tonnerre sans roulements... Ce bruit insolite était produit par une chute de foudre sur la toiture de la maison portant les n^{os} 58-60 de l'avenue de Paris.

Le fluide a frappé une cheminée *en tôle ; les fils de fer qui la soutenaient ont été fondus en partie*... La dalle qui s'étend devant la façade... porte des éraflures..., indice certain du passage du fluide. Ce dernier a continué sa course par le *tuyau de conduite* attenant à la dalle. Un voisin, nommé Lavergne, qui se trouvait accoudé à sa fenêtre en face des numéros 58-60, prétend *qu'un globe de feu s'est détaché au bas de ce tuyau ;* il a roulé lentement sur le milieu de la route ; soudain, ce globe, dont le diamètre était 20 cm « s'est brisé à la façon d'une bombe en produisant un bruit épouvantable »... Au moment de l'explosion de la *boule de feu*, toute l'avenue de Paris était illuminée ; *on aurait cru voir une coulée de fonte en fusion*. La grande lumière a été signalée par plusieurs personnes dignes de foi et qui se trouvaient à une certaine distance dans l'avenue de Paris à ce moment. La plupart de ces témoins ont dit avoir éprouvé *une forte secousse* et une impression indéfinissable... » [1]

Il s'agit encore ici d'une matière fulminante souillée de fer et qui, en éclatant, répand cette lumière *éblouissante* qui la fait comparer par les témoins à une coulée de fonte en fusion. On sait que les raies du fer dans le spectre visible sont extraordinairement nombreuses et qu'elles sont réparties presque uniformément dans toutes les parties du spectre : leur superposition doit donc produire une lumière blanche particulièrement intense.

Quant à la *forte secousse* produite, elle est purement mécanique et justiciable de la même explication que § II et § III.

(1) Dossier Houllevigue. Extrait du *Bulletin de la Commission Météorologique*, année 1894-95, par M. Barillier-Beaupré, à Fénioux (Deux-Sèvres).

IX. — Foudres globulaires qui passent par des pertuis étroits.

Cette nouvelle preuve de la tension superficielle de la matière fulminante se trouve dans les deux observations suivantes :

18°. — « ... Après avoir feuilleté quelques Bulletins Météorologiques des Deux-Sèvres, j'ai relevé les faits d'observations suivants relatifs à l'éclair en boule.

Année 1887. — Chute de foudre à Saugé-Vaussoix, le 24 juin. M. Fredet, instituteur, s'exprime ainsi : le tuyau de poêle de l'école a une solution de continuité à 3 mètres du sol; pendant l'orage du 24 juin, vers 3 h 15, après un violent coup de tonnerre, une étincelle s'est produite à la rupture du tuyau de poêle ; en même temps une *lueur* est passée à un décimètre de moi, puis devant sept élèves; elle a traversé la salle *et est sortie par une très petite ouverture laissée dans un carreau de vitre*. Le même phénomène s'est produit une demi-heure plus tard ; seulement, cette fois, la *lueur* s'est perdue sous les pieds des élèves, qui n'ont éprouvé aucune émotion. Un bruit sec a accompagné l'étincelle globulaire, de la grosseur d'un œuf de poule. *Une lueur pâle accompagnait cette étincelle sans présenter de contours bien définis* ; le globe lumineux se déplaçait lentement avec la vitesse d'un homme qui marche au pas. » (1).

La lueur pâle est un panache montrant la décomposition de la matière fulminante qui précède l'explosion finale marquée par un bruit sec.

19°. — « Mon fils, ingénieur-électricien, était avec son directeur dans son laboratoire à Asnières, peu de temps avant la guerre. Au moment où un coup de tonnerre éclatait, tous les deux virent apparaître une *boule de feu* qui traversa près d'eux la pièce, et disparut par la serrure de la porte... Les témoins n'ont ressenti aucune chaleur, n'ont relevé aucune trace de brûlure. » (2).

X. — Eclairs en boule sortis d'un appareil électrique, télégraphique ou téléphonique.

20°. — « Marseille, 23 novembre 1926.

Le phénomène s'est produit chez nous, jeudi dernier, dans la cuisine.

Il était exactement 3 heures 10 de l'après-midi. Aussitôt après un

(1) Dossier HOULLEVIGUE. Lettre du 5 mai 1925, de M. BARILLIER-BEAUPRÉ, armateur, membre de la Commission météorologique des Deux-Sèvres.
(2) Dossier HOULLEVIGUE. Lettre du 16 mai 1925, de M. E. PRAUD, de Cholet.

très violent coup de tonnerre, notre bonne *a vu se former contre le compteur de l'électricité* une *boule de feu* qui produisait une lueur rouge. Mais notre domestique a été trop terrifiée pour regarder ce qui s'est passé ensuite. *Ma grand'mère et ma grand'tante*, qui se trouvaient assises dans la salle à manger en face de la porte... (de) la cuisine, *ont vu apparaître dans l'embrasure de la porte cette masse de feu dont la couleur était à peu près celle d'un coquelicot*. Elles ont évalué sa longueur à 8 à 9 cm et sa hauteur à 4 ou 5. Pour faire un trajet d'environ 4 m depuis son point de départ, le *globe de feu était descendu* d'à peu près 50 cm. Ensuite, il devint invisible de la salle à manger... Nous pensons qu'il est parti par la cheminée, car on a trouvé quelques fragments de suie sur le fourneau. Il était arrivé *en faisant un grand bruit sec et un autre bruit de vitres fendues* et cependant aucune vitre n'a été cassée, ni fêlée. Après son départ définitif on a senti près des cheminées de la cuisine et de la salle à manger (où pourtant il n'avait pas pénétré) une mauvaise odeur rappelant un peu celle du chou pourri. Nous avons cherché de tous côtés, et nous n'avons trouvé aucune trace de brûlure ou de dégât quelconque.

Mais j'ai appris depuis que *le tonnerre en boule avait surgi dans de nombreuses maisons de notre quartier, au cours du même orage*... D'après ce qui m'a été raconté, *toutes les boules ont été plus grosses que la nôtre* et *il s'en est montré dans la plupart des maisons où le courant avait été coupé et partout il est parti du compteur électrique*... » (1)

Il est tout à fait remarquable que, dans la plupart des maisons du quartier de M. Boithat, où le courant avait été coupé par prudence, *la foudre en boule soit sortie des compteurs électriques*. Admettons, pour l'instant, cela comme un fait ; ce qui est sûr, c'est que la matière fulminante s'est souillée dans le compteur, et il est de cela plusieurs preuves. La première est que la tension superficielle a été abaissée au point que la sphère incandescente initiale a été remplacée par un court cylindre dont la longueur était grossièrement double du diamètre. Ce faible allongement provenait d'une impureté peu abondante, car la mauvaise odeur laissée par la foudre ne rappelait *qu'un peu* celle du chou pourri. Cette faible impureté avait produit un faible changement de couleur, le *rouge coquelicot* n'étant pas une des teintes du corps noir qui se refroidit.

Voici un autre cas, non moins curieux.

21°. — « ... Il y a une vingtaine d'années, alors que j'étudiais les

(1) Dossier Houllevigue. Lettre de M. Henri Boithat.

effets produits par un violent orage dans la région de Perteris (Basses-Alpes), un des assistants m'affirma avoir vú, au cours de cet orage, un *globe de feu* prendre naissance sur une canalisation triphasée à 50 000 V, 25 p:s (probablement à un parafoudre à cornes), lequel globe s'était déplacé en glissant le long des fils conducteurs. » (1)

Dans ce qui précède, l'éclair globulaire a pris naissance accidentellement dans des installations électriques usuelles sous l'influence obscure de causes météorologiques. Des phénomènes analogues se sont produits en Norvège sur des générateurs électriques de très grande puissance sous l'influence de courts-circuits involontaires. En d'autres termes, les hommes, sans le faire exprès, ou les événements, ont produit l'éclair globulaire à l'aide d'appareils industriels ; si on parvenait à reproduire à coup sûr de telles expériences, la synthèse de la matière fulminante serait faite et un grand problème naturel serait résolu en principe. Il ne resterait plus qu'à perfectionner la méthode de synthèse en la rendant la plus économique possible. En attendant qu'on en arrive là, résumons les faits.

22°. — « La synthèse de l'éclair en boule fut obtenue lors de l'essai d'un générateur de 13 500 ch, 12 000 V, par l'ingénieur norvégien A. Nielsen. Une résistance d'eau était réalisée avec un appareil à court-circuit monté en parallèle. Le générateur, après avoir été chargé, fut court-circuité en pleine charge au moyen de l'appareil à court-circuit dont on vient de parler. Alors, à l'endroit du court-circuit, se produisirent des phénomènes lumineux semblables à l'éclair en boule.

Entre les pages 6 et 7 de l'ouvrage analysé (2) se trouve une planche hors texte reproduisant deux photographies transmises par l'opérateur au professeur Nippoldt et par celui-ci au Dr W. Brand. L'image supérieure montre une grande masse de lumière, à la face postérieure de laquelle se sépare une sphère étincelante, évidemment sous l'influence de la tension superficielle. Comme la seconde figure le montre à son tour, cette sphère s'élève ensuite, abandonnant droit au-dessous d'elle le reste de la masse incandescente. Dans les deux images, la sphère apparaît plus sombre au milieu que sur les bords, ce que le Dr Brand attribue au fait d'une sphère creuse, qui serait ainsi l'analogue d'une bulle de savon. Comme nous savons que l'éclair globulaire est *plein*, nous concluons, au contraire, qu'il s'agit de la *diffusion épipolique*, la matière fulminante étant un gaz fluorescent.

(1) Dossier Houllevigue, 4 juin 1928. Lettre de M. Houllevigue à l'auteur.
(2) *Der Kugelblitz*, par le Dr Walther Brand, Oberstudienrat à Marbourg-sur-le-Lahan. Hambourg, Henri Grand, éditeur, 1923.

Nielsen fit encore les observations suivantes. Dans un cas, on vit une sphère fortement lumineuse échappée des conducteurs à haute tension (120 kV, 50 000 ch). La sphère avait un diamètre d'environ



Fig. 2.

50 mm, et fut portée par le vent à 50 m de là et se partagea en plusieurs petites sphères. La cause directe était un court-circuit arrivé à

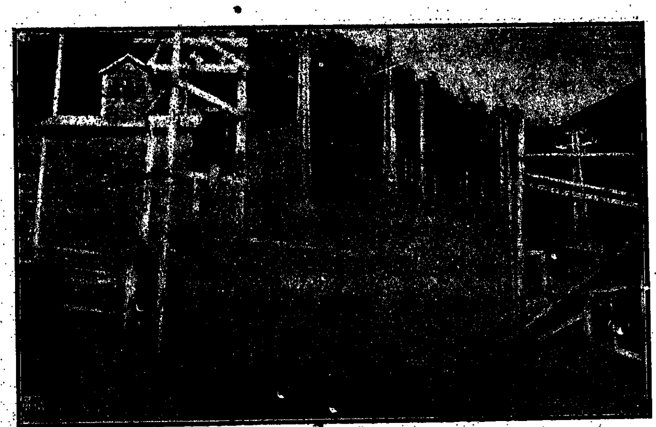


Fig. 3.

l'autre extrémité du conducteur, éloignée de quelque 7 km de l'endroit où la sphère fut observée.

Dans un dernier cas, des générateurs d'environ 40 000 ch furent court-circuités dans une Centrale. Un générateur brûla partiellement

mais put être éteint, ce qui sauva la Centrale de l'incendie. Par contre, deux petites sphères lumineuses furent soufflées à travers les ouvertures de ventilation d'un générateur travaillant en parallèle avec les autres. La machine, visitée après coup et éprouvée sur tension, montra un isolement en parfait état.

On voit donc qu'il est possible de produire des foudres globulaires au moyen d'appareils mis en court-circuit, c'est-à-dire dans des conditions qui diffèrent totalement des arcs d'aigrettes de Töpler ». [1]

On voit aussi que les nouveaux exemples de foudre globulaire décrits au cours de cet article obéissent à toutes les règles que nous avons formulées dans des mémoires antérieurs et spécialement dans le Bulletin de décembre 1930 de la Société Française des Electriciens (page 1280). [2].

COMPLEMENTS AU § I

des foudres observées simultanément par une nombreuse assistance.

« Le phénomène a eu lieu au mois de septembre très-chaud, d'une année qui peut être située entre 1898 et 1900, au château de Séricourt à *Bussières* (Seine-et-Marne), à mi-chemin entre *La Ferté-sous-Jouarre* et *Montmirail*. C'était de suite après déjeuner, donc aux environs de 13 h 30 — 14 h au cours d'un violent et court orage sans pluie. Ci-joint un croquis permettant de suivre mes explications (fig. 4).

Nous regardions l'orage à la fenêtre A avec un certain nombre de personnes de ma famille, quand un coup de foudre a frappé le sapin placé en B. Immédiatement après, nous avons vu tomber le long du même sapin (mais de beaucoup plus haut que le sapin) une grosse boule, qui pouvait avoir 0,50 m à 0,60 m de diamètre, d'un rouge orangé brillant, luminescente plutôt que lumineuse. Elle tombait relativement lentement, peut-être approximativement 2 m à la seconde, sans accélération appréciable. Arrivée au sol, elle rebondit à quelques centimètres, et roulant et rebondissant à chaque caillou, elle suivit la pente marquée sur le croquis par la ligne pointillée. En C, je la perdis de vue. Le personnel de la cuisine, qui assistait en D, nous dit l'avoir vu continuer de même jusqu'à l'escalier E.

A partir de E, le phénomène a été décrit par le jardinier et certains éléments de son récit étaient vérifiables comme je l'indique plus loin.

(1) Dr Brand, *Der Kugelblitz*, p. 169-170.

(2) Communication présentée à la séance de la 6e Section du 2 juillet 1930 et à la Séance mensuelle du 8 novembre 1930.

Donc, après l'escalier E (à une distance que je ne puis préciser, mais certainement inférieure à 4 ou 5 m), *la boule se serait divisée en une multitude de petites boules* de 1 ou 2 cm de diamètre qui auraient continué à descendre le terrain, mais non en ligne droite comme auparavant. Au contraire, les tracés étaient très sinueux, revenant parfois en arrière de leur direction générale.

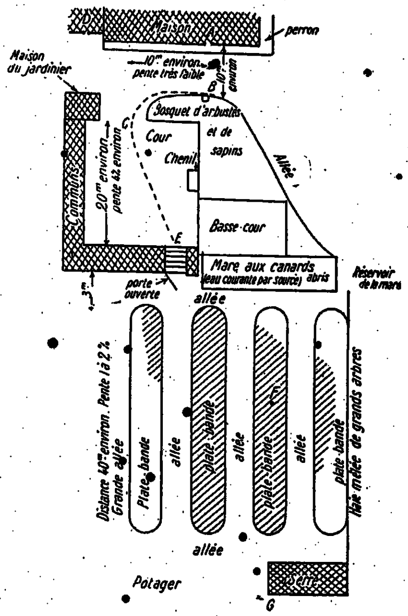


Fig 4.

L'escalier E passe en couloir sous l'immeuble.

Bâtiments.

Zone approximative des plates bandes où se trouvaient les sillons.

La largeur des plates-bandes est de 2 m environ, celle des allées de 1,50 m environ

La majorité de ces petites boules se dirigèrent par des lignes aussi sinueuses *vers le jardinier*, qui était en F, plus mort que vif (et qui qui resta malade trois jours au lit à la suite de son émotion) *et tournèrent autour de lui* en croisant leurs traces, puis au bout de quelques minutes, s'éloignèrent de lui. *Toutes les boules élémentaires* se retrouvèrent au pied de l'échelle de fer de la serre, en G, *se reformèrent en une boule unique* qui monta le long de l'échelle, puis dans l'atmosphère où elle disparut subitement à une hauteur peu élevée, *sans explosion.*

Le jardinier rentra aussitôt chez lui, et, comme il déclara que les boules avaient laissé des traces, nous allâmes les voir. Effectivement, dans les plates-bandes, on constatait de multiples sillons d'un centimètre de profondeur environ, aux tracés sinueux et qui, autour des marques de pied du jardinier, parfaitement nettes, s'entrecroisaient en tournant autour des marques de pieds, puis tous les sillons se dirigeaient vers l'échelle de la serre.

Ces traces n'existaient, par contre, que sur les plates-bandes : dans les allées, sablées, il n'y avait aucune marque, ce qui empêchait, vu le nombre de sillons, de les suivre individuellement. Autour du jardinier, les sillons les plus proches étaient à 4 ou 5 cm des marques de ses pas.

Telles sont les constatations que j'ai faites personnellement et que j'ai recueillies immédiatement des autres témoins. *Ces faits furent constatés par une quinzaine de personnes* dont 4 vivent encore : ma mère, ma sœur, moi et le valet de chambre de mon oncle. » (1).

Cette magnifique observation, riche en particularités, montre à elle toute seule : *a*) par la multiplicité des témoins l'objectivité d'une énorme foudre sphérique née de l'éclair fulgurant qui a foudroyé le sapin : *b*) la chute de la matière fulminante dans l'air : *c*) la pureté de cette matière qui a bien l'une des teintes du *corps noir* qui se refroidit ; *d*) ses propriétés élastiques par son rebondissement ; *e*) la diminution de la tension superficielle de la matière fulminante souillée au contact du sol par son partage en une multitude de petites *sphères excavatrices* productrices de sillons profonds d'un centimètre, *f*) *la désélectrisation de ces sphères* au contact du sol prouvée par le fait qu'après leur réunion en un seul globe ascendant, celui-ci disparaît spontanément *sans explosion* comme les foudres du § VI.

De plus, la foudre en question est de longue durée (plusieurs minutes et, après avoir roulé sur le sol, elle rassemble les sphères élémentaires dans lesquelles elle s'était à un certain moment partagée et remonte dans l'air après en être descendue. Elle résume à elle toute seule les principales articularités expliquées par nous dans les mémoires antérieurs, et rappelle par les principales de ces particularités la foudre qui s'arrêta sur le poitrail du cheval attelé à la voiture de M. Ernest de Poulpiquet (2).

---

(1) Lettre adressée à l'auteur, le 2 mars 1932, par M. André Machelord, Ingénieur-Conseil, Diplômé de l'Ecole supérieure d'Electricité, 86, rue de Monceau, Paris, 17e.

(2) E. Mathias, La matière fulminante (fin), caléfaction, énergie, *Ann. des P. T. T.*, décembre 1929, § 8.

COMPLEMENT AU § VII

des observations montrant la transformation directe de l'éclair linéaire en foudre sphérique.

« Quant à l'observation personnelle (suivante)... je n'en sais pas la date exacte. C'était en mai 1929, au cours d'un orage, vers 6 heures du soir, aux environs de Lunéville. J'étais dans le train, lequel avait l'air de cheminer dans une véritable grêle d'éclairs. J'ai vu un de ces éclairs se terminer dans l'atmosphère et *à l'extrémité se sont manifestés deux ou trois points lumineux qui sont restés suspendus dans l'atmosphère* à la manière de ces pièces d'artifice, dites chenilles, qui descendent lentement dans l'air... sous cette forme, le phénomène a duré environ 2 secondes. » (1)

Dans cette curieuse observation, les points lumineux sont des éclairs sphériques de très petit rayon, qui montrent une fois de plus la chute de la matière fulminante dans l'air.

(1) Extrait d'une lettre adressée à l'auteur, le 21 mars 1930, par M. E. Esclangon, membre de l'Institut, Directeur de l'Observatoire de Paris.

OBSERVATIONS SUR LE RAPPORT DE M. PRACHE "LE CINÉMA PARLANT" (1)

par M. I. Podliasky,

Ingénieur E. S. E. (2)

On peut ne pas être d'accord sur l'affirmation de M. Prache, que « dans les voix masculines, le son *fondamental*, qui porte la plus grande partie de l'énergie sonore, est de fréquence inférieure à 300 p:s ». Qu'entend-on par « fondamental » ?

Dans la théorie des « formantes », les formantes de toutes les voyelles ont des fréquences supérieures à 300 p:s et les formantes des consonnes ont des fréquences supérieures à 700 p:s.

Quant au transport de la majeure partie de l'énergie du spectre total, il n'est pas nécessaire d'admettre que, de ce fait, l'auditeur doive reconstituer les fréquences manquantes, si celles-ci se trouvent dans le grave.

Une telle reconstitution mentale serait nécessaire si ces fréquences contribuaient fortement à l'intelligibilité, mais il est bien connu que les fréquences inférieures à 300 p:s n'y contribuent précisément pas.

Je prétends que le timbre de voix change considérablement lorsque l'on exclut toutes les fréquences inférieures à 300 p:s. Dans des expériences effectuées avec un filtre passe-haut, on constate immédiatement l'altération du timbre et souvent une amélioration d'intelligibilité, en supprimant les fréquences inférieures à 300 p:s. Tout en restant parfaitement intelligible, un baryton devient ténor. (Voix parlée, et non chantée).

Je trouve plus loin, dans l'étude de M. Prache (§ 4) une affirmation qu'il est difficile de ne pas relever : « Le procédé qui précède (enregistrement par tube à effluve ou à décharge, que M. Prache appelle

---

(1) *Bulletin de la Société française des Electriciens*, 5e série, tome I, n° 12, décembre 1931, p. 1253.

(2) Communication présentée à la séance du 1er mars 1932 de la 5e section du Comité d'administration de la Société française des Electriciens, sous la présidence de M. H. Milon. Cette communication et la réponse de M. Prache font partie des documents qui serviront de base à la Semaine de Discussion de novembre 1932, pour une discussion générale sur l'acoustique.

« lampe éclair ») ne permet pas d'éviter les effets d'inertie lumineuse de la lampe ».

Le procédé visé a été étudié en Amérique, entre autres par Lee de Forest et en Allemagne par Engl, Vogt et Masolle (Tri-Ergon, plus tard Tobis) et, correctement employé, il fournit d'excellents enregistrements.

Des expériences personnelles me permettent d'affirmer que les effets « d'inertie » dans de tels tubes ne sont pas plus sensibles que dans tous les oscillographes et « valves de lumière » actuellement utilisés. Les premiers modèles de « light valve » de la Western Electric avaient une fréquence propre de 7 kp:s ; c'était peu, vu l'amortissement *relativement faible* de ces appareils. Dans les modèles récents,

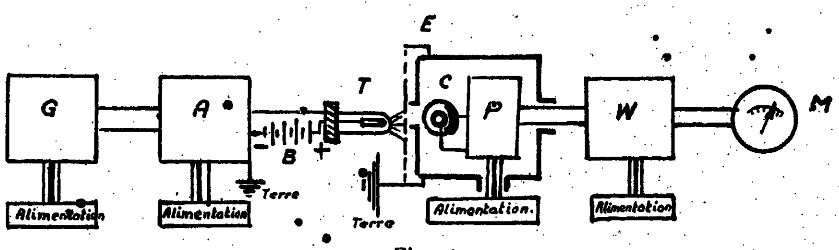


Fig. 1.

cette fréquence propre est reculée jusqu'à 9 ou 10 kp:s. La fréquence propre des meilleurs oscillographes bifilaires est de l'ordre de 12 kp:s (chiffres des catalogues...). *C'est précisément l'inertie mécanique de l'équipage qui ne permet pas d'atteindre des fréquences propres inaudibles* ; avec tous ces vibrateurs mécaniques, des résultats corrects ne peuvent être obtenus que grâce à un amortissement artificiel énergique.

Avec des tubes à effluves de construction récente, on monte jusqu'à 50 kp:s, sans affaiblissement exagéré de l'amplitude de l'oscillation lumineuse. Ces tubes, avec la cellule de Kerr, sont même les seuls exemples pratiques d'appareils enregistreurs parfaitement et naturellement apériodiques.

Voici une description schématique de mes expériences sur l'inertie lumineuse des tubes à effluves de construction déjà ancienne. Une dizaine de modèles de tubes couramment exploités a été expérimentée (3). Les appareils étaient montés conformément au schéma (fig. 1).

(3) Ces expériences ont été effectuées aux Laboratoires des Etablissements Kraemer, à Asnières, spécialement équipés pour la photométrie statique et dynamique de divers dispositifs d'inscription photographique du son.

G générateur de courant alternatif *d'amplitude constante* et de fréquence pouvant varier d'une façon continue entre 20 et 10 000 p:s,

A amplificateur d'une puissance utile de quelques watts,

T tube à effluves en essai,

B batterie d'excitation,

E écran électrostatique constitué par un grillage métallique à mailles très fines,

C cellule photoélectrique à gaz rare,

P l'amplificateur du courant photoélectrique (préamplificateur),

W deuxième amplificateur, débitant sur un appareil de mesure M (thermique ou à redresseur d'oxyde de cuivre spécialement agencé pour la mesure correcte des courants dans la bande 20-12 000 p:s.

La cellule et son préamplificateur étaient soigneusement blindés

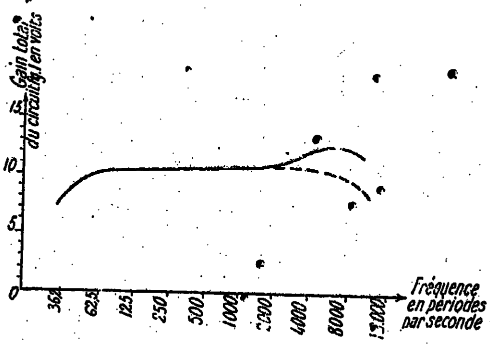


Fig. 2.

pour éviter l'influence électrostatique du tube à effluves, auquel on appliquait une différence de potentiel musical de l'ordre d'une cinquantaine de volts.

Dans ces conditions, la courbe de réponse *totale* du système avait toujours l'allure représentée (fig. 2) ; une légère bosse aux environs de 8 kp:s provenait des transformateurs de l'amplificateur A, comme l'a montré le tracé de la courbe de réponse de cet amplificateur seul. La chute de la courbe aux environs de 10 à 12 kp:s doit être expliquée par l'influence des capacités de la cellule photoélectrique et des amplificateurs ; car cette chute demeurait malgré le changement du tube. Les tubes essayés provenaient de constructeurs français, anglais, allemands, américains ; un seul de ces tubes a montré une chute plus prononcée de l'amplitude de l'oscillation lumineuse entre 8 et 10 kp:s (pointillé, fig. 2).

On voit qu'entre 30 et 10 000 p:s, les tubes à lueurs étudiés peuvent être considérés comme des systèmes sensiblement apériodiques et dé-

nués d'inertie lumineuse appréciable. Il est bon de rappeler ici que *le grain de l'émulsion* cinématographique provoque un affaiblissement appréciable de l'inscription déjà au-dessous de 10 kp:s.

On a bien pu parler d'un « traînage lumineux » dans certains tubes et employer un mélange gazeux spécial pour l'éviter. Il s'agit là, probablement, des tubes de télévision, employés par tout ou rien, c'est-à-dire avec extinction du tube entre deux impulsions électriques. Dans les tubes à décharge, le traînage à l'allumage et à l'extinction est en général considérable, ce qui est gênant *pour l'emploi par tout ou rien*. Dans l'application à l'inscription du son sur film, on ne laisse au contraire jamais le tube s'éteindre ; on l'excite à l'aide du courant continu, auquel on superpose des courants musicaux, et l'on surveille l'amplitude de ces derniers, de façon que leurs crêtes négatives (donnant une diminution d'illumination) n'arrivent jamais au seuil d'extinction. Dans ces conditions, le traînage est tout à fait insignifiant et permet la reproduction sans distorsion des fréquences les plus élevées de l'échelle musicale.

Au sujet de la faiblesse d'inertie lumineuse en régime soutenu, on peut consulter : « *Der tönende Film* » du Docteur ENGL (1927), une étude récente de M. MAYER dans *l'Elektrotechnische Zeitschrift* du 16 juillet 1931, etc...

Les vraies difficultés d'emploi du tube à décharge provenaient, au début de l'industrie du film sonore, de la faiblesse de la luminescence obtenue avec les premiers tubes. La durée d'exposition de la pellicule est de l'ordre de cinq cent-millièmes de seconde (passage devant une fente de 20 μ à la vitesse d'environ 460 m/m:s). Il s'ensuit qu'un éclat considérable de la source lumineuse est nécessaire pour l'impression, d'autant plus que la réduction au minimum de la distorsion photographique impose des éclats très supérieurs au strict minimum permettant de vaincre l'inertie de la pellicule. Pour bien poser la question, il me faut dire quelques mots sur les conditions sensitométriques de l'inscription sur pellicule.

L'opacité du film est définie par le rapport de la quantité de lumière incidente à la quantité de lumière transmise par la pellicule impressionnée et développée ; soient N_n l'opacité de la bande négative, N_p l'opacité de la bande positive. Si la quantité de lumière tombant sur le négatif *pendant l'enregistrement* est L_n et la quantité de lumière tombant sur le positif *pendant le tirage* est L_p, on a d'une façon générale :

$$N_n = \varphi(L_n); \qquad N_p = \psi(L_p),$$

φ et ψ étant deux fonctions rapidement croissantes avec L. L_n re-

présente la quantité de lumière issue de l'appareil d'inscription ; elle suit fidèlement la forme du courant microphonique et peut être représentée par : $L_n = L_0(1 + K \sin \omega t)$ pour un son simple [4].

La bande négative, une fois développée, ne doit pas être employée à la reproduction directe du son, car si on la déroule entre une source fixe de lumière et une cellule photoélectrique, le courant de cette dernière, proportionnel à son éclairement, sera également proportionnel à la *transparence* de la bande négative.

La transparence est définie comme l'inverse de l'opacité

$$\frac{\text{lumière transmise}}{\text{lumière incidente}}$$

et le courant de la cellule aura la forme :

$$i = \frac{A}{\varphi(L_n)} = \frac{A}{\varphi[L_0(1 + K \sin \omega t)]} = \varepsilon + \alpha \sin \omega t + \beta \sin 2\omega t + \delta \sin 3\omega t + \ldots$$

La reproduction sans distorsion non linéaire à partir de la bande négative est donc impossible. La compensation nécessaire est précisément obtenue par un tirage convenable du positif. On superpose la bande négative impressionnée et la bande positive vierge devant une source fixe de lumière. L'éclairement du positif est alors représenté par :

$$L_p = \frac{A}{\varphi(L_n)}.$$

Après développement du positif, l'opacité obtenue est :

$$N_p = \psi\left[\frac{A}{\varphi(L_n)}\right]$$

et lorsque le positif se déroule entre une source fixe de lumière et la cellule photoélectrique, l'éclairement de cette dernière est :

$$\frac{B}{\psi\left[\frac{A}{\varphi(L_n)}\right]}.$$

La distorsion photographique est nulle, lorsque l'éclairement de la cellule est simplement proportionnel à l'éclairement du film négatif par l'organe d'inscription. D'où, en bloquant les coefficients sous le symbole C, *la condition générale de non distorsion* :

$$L_n = \frac{C}{\psi\left[\frac{A}{\varphi(L_n)}\right]}. \qquad (1)$$

(4) K est le taux de modulation de la lumière.

Entre certaines limites d'exposition, les courbes sensitométriques peuvent être représentées par des équations empiriques

$$\left.\begin{array}{l}\varphi(\mathrm{I}_n) = a\mathrm{I}_n^{\gamma_n} \\ \psi(\mathrm{I}_p) = b\mathrm{I}_p^{\gamma_p}\end{array}\right\} \text{(courbes de Hurter et Drieffeld)} \qquad (2)$$

En substituant dans l'équation (1), on trouve une relation entre A, C, a, b, γ_n, γ_p et, de plus, la condition (dite de Goldberg)

$$\gamma_n \gamma_p = 1$$

Pour une émulsion et un bain donnés, les exposants γ dépendent de la durée de développement ; elles déterminent les contrastes photographiques.

Le choix du γ_p est dicté par le fait que la bande positive reçoit l'inscription sonore et l'image cinématographique en même temps. La pratique cinématographique impose *pour l'image* : $\gamma_p = 1{,}8$ à $2{,}0$, pour que les contrastes soient agréables à l'œil. La condition de Goldberg conduit donc au $\gamma_n = 0{,}6$ à $0{,}5$, ce qui suppose un développement de faible durée. Tout ceci n'est vrai qu'entre les limites où les courbes sensitométriques peuvent se traduire par les paraboles (2).

Il s'ensuit que l'intensité lumineuse moyenne L_0 (en absence de modulation) est quasiment imposée ; c'est cette valeur L_0 qu'il est difficile, sinon impossible, d'atteindre avec certains tubes à effluves, vu principalement le mauvais rendement optique des systèmes condenseurs et objectifs nécessaires pour réduire l'image de la fente à une largeur de 20 μ. Un éclairement beaucoup plus considérable peut facilement être obtenu si l'on tolère une largeur de fente de l'ordre de 40 à 50 μ. La distorsion photographique non-linéaire est alors moins à craindre, mais ces largeurs de fente conduisent à une distorsion linéaire considérable (atténuation des fréquences élevées du spectre musical).

Lorsque la quantité de lumière à l'inscription est insuffisante, on est conduit, pour l'obtention des opacités convenant au tirage, à augmenter la durée du développement du négatif, c'est-à-dire la valeur du γ_n. Le γ_p du positif restant toujours de l'ordre de 2, la condition de Goldberg n'est plus satisfaite et le γ résultant ($n = \gamma_n \cdot \gamma_p$) est supérieur à l'unité. Le courant de la cellule photoélectrique de lecture s'exprime alors (en fonction de l'éclairement pendant l'inscription) par :

$$i = h\,\mathrm{L}_n^{\gamma_n \gamma_p} = \mathrm{I}_0(1 + \mathrm{K}\sin \omega t)^n\,; \qquad (n > 1),$$

pour un son simple, et en supposant que l'on opère toujours dans les régions des courbes représentées par les équations (2). Une distorsion non-linéaire (distorsion photographique) s'introduit. Le taux de cette

distorsion (défini comme le rapport de l'intensité efficace de tous les harmoniques à l'intensité efficace de l'onde fondamentale) est aisément calculable à partir de l'expression ci-dessus. On trouve pour ce taux la valeur approchée :

$$D = \frac{(n-1)K}{4},$$

(en négligeant les harmoniques de rang supérieur à deux) ; en même temps, le courant moyen de la cellule est augmenté dans le rapport : (effet de détection photographique)

$$1 + \sum \frac{n(n-1)\ldots(n-2m+1)}{2^{2m}\,(m\,!)^2} K^{2m} \text{ (5)}.$$

On peut imaginer plusieurs procédés pour la mesure de la distorsion photographique. Leur exposé nous entraînerait trop loin. Signalons simplement qu'en enregistrant un son simple et en soumettant le positif à la lecture, on applique aisément le pont filtrant de M. Belfils à l'élimination de l'onde fondamentale et à la mesure du résidu. Les lectures des appareils donnent le rapport de la valeur efficace du résidu à celle de l'onde complexe, d'où l'on déduit facilement le taux de distorsion non-linéaire défini plus haut (« Klirrfactor »).

J'ai imaginé récemment une méthode assez générale de compensation de la distorsion non-linéaire et de la distorsion photographique en particulier; mais elle n'est pas encore entrée dans la pratique courante et il me semble prématuré de l'exposer.

La solution photographiquement idéale consiste à augmenter l'éclairement à l'inscription ; c'est chose facile dans les systèmes à « clapet lumineux », où la source de lumière est fixe (light valve Western, Cellule de Kerr-Karolus de Klangfilm, etc...)

Avec les tubes à effluves, la tendance actuelle est le passage du régime d'effluve au régime d'arc. En particulier, l'arc à vapeur de mercure donne des résultats remarquables. Le régime d'arc (possible sous pressions assez élevées) se distingue par le fait que la cathode devient émettrice d'électrons, et que les gaz ou vapeurs contenus dans le tube sont ionisés par choc. La cathode peut être auto-excitatrice, si elle devient incandescente sous l'influence de la décharge ; notre collègue M. Abadie a mis aimablement à ma disposition un tube de sa construction basé sur ce principe. Ce tube, pratiquement dénué de traînage jusqu'à 10 ou 12 k p:s, permet un développement de certaines pellicules sensibles avec $\gamma_n = 0{,}6$; (la densité photographique obtenue dans ces

(5) $m = 1, 2, 3, \ldots$

conditions est de 0,6 la « densité » est définie en photographie comme le logarithme décimal de l'opacité). Au point de vue photographique, on arrive ainsi à égalité de qualité avec les systèmes à source fixe de lumière (Western, Klangfilm).

Un autre tube à décharge a été établi récemment en France par la Société Elecson. La cathode est à excitation séparée (cathode chauffée par un courant indépendant et recouverte d'oxydes, comme dans certaines triodes) et une 3e électrode l'entoure partiellement, en laissant un petit canal d'échappement d'ions vers l'anode. La particularité de ce tube est une très faible chute interne de potentiel. Ses effets actiniques sont également remarquables.

Deux régimes sont généralement possibles avec tous ces tubes, où la vapeur de mercure est mélangée à certains gaz rares. Le régime « faible » donne lieu à une résistance positive, au point de vue élec-

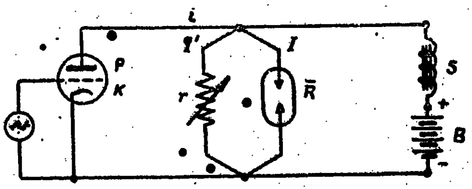


Fig. 3.

trique ; le régime « fort », remarquable par son actinisme, donne lieu à une *résistance négative*, ce qui s'explique aisément. On arrive à rendre la valeur absolue de cette dernière résistance assez faible, et la mise en série du tube et de l'espace anode-cathode d'une triode, permet d'obtenir une résistance totale positive et très sensiblement constante sur 90 pour cent d'étendue utile de la caractéristique.

L'existence d'une résistance négative dans le tube à décharge permet certains montages curieux au point de vue électrique. La mise en série d'un tube à décharge (doué d'une résistance négative $\bar{R}$) avec une triode de résistance interne ρ, voisine de $|\bar{R}|$, permet une augmentation considérable de la pente dynamique de la triode ; cette pente dynamique est alors très supérieure à $S = \frac{K}{\rho}$, qui est la pente statique de la triode. (K étant son facteur d'amplification).

Un autre montage permet d'attaquer un tube à décharge puissant par une petite triode, dont le courant de saturation peut être faible devant le courant de la décharge (fig. 3).

La résistance apparente de débit de la triode est ici $\frac{\bar{R}\,r}{r+\bar{R}}$; elle

tend vers l'infini lorsque r tend vers la valeur absolue de $\overline{R}$. (on suppose qu'un courant alternatif négligeable traverse la source B, du fait de la présence de l'inductance S). En même temps, le rapport entre le courant alternatif dans le tube à décharge et le courant alternatif anodique de la triode devient :

$$\frac{I}{i} = \frac{I}{I' - I} = \frac{r}{r + \overline{R}}$$

Il tend vers l'infini pour $r \simeq \overline{R}$. Avec des amplitudes du courant anodique de l'ordre de 10 mA, on peut facilement faire passer dans le tube à décharge des courants efficaces de l'ordre de 0,1 à 0,2 A. Tout se passe comme avec les circuits « bouchons », utilisés en haute fréquence ; mais ici, les phénomènes sont indépendants de la fréquence, les variations I et I' s'effectuant toujours en opposition de phase.

L'intérêt de ces montages est plutôt théorique que pratique. D'une part, l'économie réalisée ne porte que sur la puissance des triodes, la puissance de la source de courant B ne cessant de croître avec celle de la décharge. D'autre part, l'inconvénient manifeste de ces schémas est l'exagération de la constante de temps des circuits ; la résistance totale de ceux-ci tendant vers zéro ou vers l'infini, la présence de moindres inductances en série ou de moindres capacités en dérivation conduit à une distorsion linéaire considérable.

Enfin, la valeur absolue d'une résistance négative est rarement constante sur une bonne étendue de la caractéristique ; de plus, les variations *dans le temps* de cette valeur conduisent à une instabilité de fonctionnement. L'utilisation de la résistance négative des « dynatrons » n'a jamais eu d'extension pratique pour les mêmes raisons.

RÉPONSE DE M. PRACHE

S'il est vrai que, dans la parole, l'émission de certains sons et en particulier des consonnes est extrêmement brève, on constate que dans la prononciation des voyelles qui forment la hauteur de la voix, l'émission est suffisante pour qu'il s'établisse un régime sensiblement permanent. On peut le vérifier aisément sur les bandes de films sonores. Il est alors légitime d'appliquer la décomposition en série de Fourier. Ceci est encore plus exact pour le chant où le débit est beaucoup plus lent. Si l'on applique cette décomposition aux voix d'hommes, on constate que le son fondamental tombe en général entre

100 et 300 p:s. Rappelons d'ailleurs que dans l'échelle musicale, les voix de barytons vont de 85 à 350 p:s et celles de ténors de 128 à 480 p:s.

Lorsqu'on supprime par un filtre passe-haut le fondamental, et même les premiers harmoniques, le son est déformé, mais l'auditeur n'a pas l'impression que la hauteur du son ait varié, un baryton reste baryton. Ceci ne peut s'expliquer que si l'on admet que l'oreille, aidée par le cerveau, reconstitue les fréquences manquantes, ce qui comporte bien un travail mental. Ce travail est conscient chez les personnes non averties, telles que celles qui se servent pour la première fois d'un téléphone, et devient inconscient par l'habitude, mais il n'en subsiste pas moins.

En ce qui concerne la déformation du timbre, tout dépend de sa définition. Si l'on admet, comme l'indique le LAROUSSE, que « le timbre est la qualité qui distingue deux sons de même hauteur et de même intensité », il en résulte logiquement que les fréquences hautes seules forment le timbre. Les fréquences basses servent au contraire à donner à la voix son ampleur ou ce que j'ai appelé naturel, traduction littérale du mot « natural » employé par les Américains.

Au sujet de l'enregistrement par lampe éclair ou lampe à effluves, les précisions apportées par M. PODLIASKY expliquent très clairement les difficultés qui ont été rencontrées dans les premières applications de ce procédé.

Il est certain que lorsque les recherches qui se poursuivent actuellement à ce sujet auront permis d'éliminer toutes ces difficultés, l'enregistrement par lampe éclair reprendra une place prépondérante dans l'enregistrement des films parlants.

MESURE DU RAYONNEMENT ULTRA-VIOLET [1]

par M. Maurice Leblanc.

Travaux des Congrès. — Questionnaire du Docteur Saidman. — *Intérêt de la question. — Mesure absolue. — Détermination du minimum perceptible d'érythème cutané. — Méthode* Coblentz. — *Filtres. — Luxmètres.*

La mesure du rayonnement ultra-violet d'une source lumineuse, le choix d'une unité pratique pour exprimer cette mesure sont des questions actuellement à l'ordre du jour.

La Commission Internationale d'Eclairage, à la demande du Comité National des Pays-Bas, a accepté de la comprendre dans son programme de travail et a formé, pour son étude, un comité secrétariat qui a été confié à ce pays.

Le Numéro de Septembre 1931 des Transactions of the Illuminating Engineering Society de New-York, contient trois articles sur ce sujet, le premier de Luckiesh, Directeur du Laboratoire des Recherches sur l'éclairage de la General Electric Company, le deuxième de Taylor et Holladay du Laboratoire des Recherches, sur l'éclairage des Usines de Lampes Edison, le troisième de Sharp et Little, de l'Electrical Testing Laboratory à New-York. Notons en passant que les numéros de juillet 1931 et janvier 1932 de cette même revue étaient d'autre part consacrés aux sources d'ultra-violet et à leurs applications.

Enfin, le premier Congrès International d'Actinologie, qui a eu lieu à Paris en juillet 29, a mis à l'ordre du jour la question de la mesure du rayonnement ultra-violet utilisé en médecine.

Dans le but de trouver une solution pratique, peut-être pas parfaite mais utile en actinothérapie ou en héliothérapie, le congrès, après avoir entendu les rapports de MM. Saidman, Coblentz et Keller et les congressistes qui ont pris part à la discussion, a nommé une Commission Internationale chargée d'étudier et de proposer une solution définitive pour le prochain Congrès de la Lumière qui doit avoir lieu cette année à Copenhague.

---

(1) Communication présentée devant la 2e Section de la Société française des Electriciens, le 8 mars 1932 sous la présidence de M. Jouaust.

Ce Comité comprend, au maximum, deux membres par pays, dont un physicien et un médecin, chargés de centraliser et de rapporter les travaux effectués dans leur propre pays.

Afin d'unifier les recherches, le Comité s'est chargé d'adresser, aux Sociétés Savantes, un référendum qui pourra être suivi d'autres circulaires complémentaires.

M. Jean Saidman, Secrétaire Général du Comité International et Directeur de l'Institut d'Actinologie, a rédigé un questionnaire très complet qui peut être utilisé comme guide pour l'étude de la question. Celle-ci, qui intéressait surtout jusqu'ici les médecins et les physiologistes, a pris un intérêt particulier pour les éclairagistes et les fabricants de lampes et appareils d'éclairage, depuis que l'on demande à certains de ceux-ci de fournir, non seulement les radiations nécessaires à la vision, mais aussi celles de longueurs d'onde plus courtes, qui existent dans le spectre solaire, et qui sont nécessaires à la santé. Les laboratoires de mesures photométriques doivent donc s'attendre à avoir à délivrer des certificats donnant, pour certains appareils lumineux, des renseignements, non seulement sur le flux lumineux, mais encore sur le flux ultra-violet et la question qui se pose est de déterminer par quels procédés et sous quelle forme ils pourront fournir ces renseignements. Le problème pourra aussi se poser de déterminer, en certains points d'une installation d'éclairage réalisée avec des appareils de cette espèce, non seulement l'éclairement, mais encore le flux ultra-violet reçu. Les deux problèmes sont partiellement distincts parce que si, dans un local, les réflexions par le plafond et les parois interviennent pour les radiations lumineuses, il n'en est pas de même pour les radiations ultra-violettes, pour lesquelles leur coefficient de réflexion est pratiquement nul si leur surface n'a pas été spécialement préparée.

Au point de vue mesure absolue, aucune hésitation, le rayonnement ultra-violet est un rayonnement d'énergie dont la puissance doit être mesurée en watts. Si l'on admet que les limites en longueurs d'onde du spectre thérapeutiquement agissant aient été fixées par les médecins, l'accord n'est pas encore complètement réalisé sur ce point; on pourra, en général, sans trop de difficulté, isoler à l'aide de filtres cette région dans le spectre total de la source et donner une mesure de la puissance du rayonnement limité à cette région. Si cela ne suffit pas, on pourra même y donner la répartition de l'énergie en fonction de la longueur d'onde, mais on sait le très long temps qu'exigent ces mesures, aussi ne peut-on guère les con-

sidérer comme pouvant être réalisées de façon fréquente pour les sources d'éclairage usuelles.

Malheureusement, les renseignements ainsi donnés ne sont pas encore suffisants, car tous les phénomènes photochimiques sont sélectifs. Dans le cas de la lumière, lorsqu'on connaît la répartition de l'énergie dans le spectre des radiations visibles d'une source, pour en déduire son intensité lumineuse, on doit utiliser la courbe de sensibilité de l'œil moyen. En réalité, c'est tout à fait exceptionnellement qu'on effectue cette suite d'opérations, elles sont réalisées synthétiquement par une seule mesure à l'aide d'un photomètre si l'observateur dispose d'une vision normale.

Serait-il possible de réaliser quelque chose d'analogue dans le domaine des radiations thérapeutiques ?

Une bonne santé est un état difficile à définir avec précision, qui dépend d'ailleurs de bien d'autres facteurs que de la composition du flux de radiations dans lequel on est appelé à vivre et qui, en tous cas, varie lentement. il ne semble donc pas qu'on puisse trouver dans l'observation de ses modifications un procédé de mesure.

On doit donc choisir un phénomène biologique plus limité et plus précis. On choisit la formation de l'érythème cutané, c'est-à-dire d'une rougeur qui se produit sur la peau, non préalablement halée, quelques heures après qu'elle a été exposée au rayonnement ultra-violet.

La détermination du minimum d'érythème perceptible (M. P. E) comme le prouve la concordance des résultats trouvés par différents observateurs, peut être faite avec une précision suffisante pour le but poursuivi ; elle est d'un ordre élevé si on la compare à celle obtenue en général dans la mesure des phénomènes biologiques. En opérant sur un assez grand nombre d'individus, il est possible d'en choisir deux ou trois dont la réaction moyenne puisse être considérée comme assez voisine de la moyenne générale pour des applications pratiques.

La quantité d'énergie totale, biologiquement efficace, nécessaire pour produire l'érythème minimum perceptible (visible 16 à 20 h plus tard) paraît être de l'ordre de grandeur convenable, plus grande en fait que celle nécessaire pour assurer le maintien de la santé. Comme nous l'avons fait remarquer plus haut, il s'agit là d'une information extrêmement vague, car l'influence de la radiation ultra-violette sur une personne en bonne santé n'a pas été établie.

Nous savons cependant qu'il a été déduit, des expériences sur le rachitisme, que la dose préventive est seulement de l'ordre du 1/3 au 1/10 de la dose curative.

D'autre part, la région la plus favorable pour la production de l'érythème semble être également la plus favorable dans la cure du rachitisme et est appelée pour cette raison « région anti-rachitique ». Probablement, elle contient les radiations qui accélèrent le métabolisme du calcium, qui peuvent être aussi celles qui augmentent la

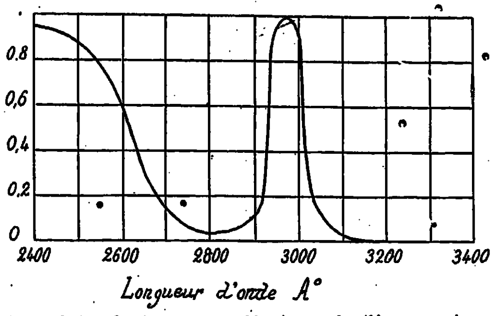


Fig. 1. — Efficacité relative des radiations de diverses longueurs d'onde pour la formation de l'érythème.

proportion d'hémoglobine du sang. Les résultats obtenus par les différents observateurs sont très comparables et on obtient une courbe analogue à une courbe de résonance assez pointue dont le maximum correspond à $\lambda = 2\,967$, qui passe par la valeur 0 pour $\lambda = 3\,200$ et

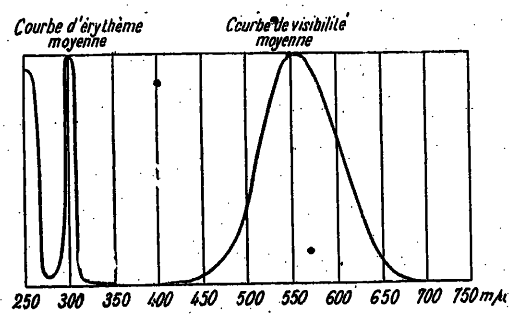


Fig. 2. — Position dans le spectre de la coube d'érythème moyenne et de la courbe de visibilité moyenne.

qui, du côté des petites longueurs d'onde, présente un minimum très accusé pour $\lambda = 2\,800$. Cette dernière limite est également celle des longueurs d'onde les plus courtes que l'œil peut supporter pendant longtemps et en quantité appréciable, sans danger (fig. 1 et 2).

On est donc ainsi en possession d'une courbe analogue à la courbe de visibilité de l'œil moyen. Comme nous l'avons expliqué précédemment, si intéressant que soit ce résultat, il est difficile à utiliser pratiquement.

Il paraît d'autre part peu pratique d'utiliser un procédé analogue à celui de la photométrie, c'est-à-dire de faire agir l'ensemble du rayonnement sur la peau d'un individu doué d'une sensibilité moyenne, non pas à cause des préjugés que pourrait soulever l'utilisation dans un laboratoire de cette méthode inusitée, mais à cause du temps relativement très long nécessaire pour l'apparition de l'érythème après l'exposition aux radiations actives.

Il y aurait grand intérêt à découvrir une réaction photo-chimique rapide, d'une mesure facile et d'une sélectivité aussi voisine que possible de celle de la formation de l'érythème cutané et qu'on puisse

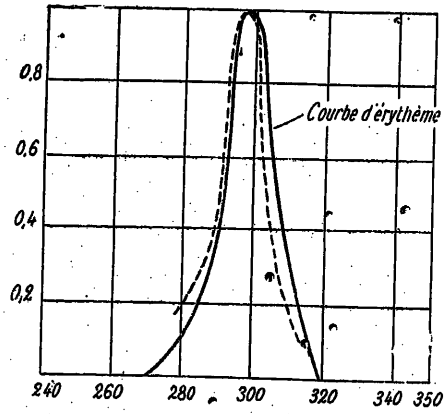


Fig. 3. — Courbe de sensibilité d'une cellule du sodium utilisée avec les filtres suivants :
1 cm acide picrique acide dans une cuve en quartz ;
4,84 mm corex pourpre ;
1,94 mm corex D.

substituer à cette dernière. On a essayé de le faire, soit en isolant la région d'érythème par des milieux absorbants sélectifs bien choisis, soit en utilisant la réponse sélective de certaines cellules photoélectriques. Coblentz a utilisé, par exemple, ce procédé pour déterminer la proportion d'ultra-violet antirachitique contenu dans le spectre solaire, par la différence des indications données par une pile thermoélectrique avant et après interposition d'une plaque de verre (flint au baryum) qui absorbe toute radiation inférieure à 310 $m\mu$. Comme le spectre solaire ne contient pas de radiations inférieures à 290 mµ, on peut admettre que l'interposition de cette plaque de flint supprime bien la région antirachitique. Ceci n'est en réalité que grossièrement approché, parce que la transparence du verre ne s'arrête pas brusquement pour une longueur d'onde déterminée et que, par suite, il y a absorption partielle dans la région de transmission et, au contraire,

transparence partielle pour des longueurs d'onde plus petites que 310 $m\mu$.

Par conséquent, si cette méthode peut être utilisée pour comparer la variation de l'ultra-violet dans le spectre solaire de jour en jour ou d'heure en heure, il est nécessaire de la modifier ou de la perfectionner quand il s'agit de mesurer d'autres sources d'énergie ultra-violette. On peut se rendre compte de l'absorption du filtre de la manière suivante : supposons qu'il s'agisse d'une lampe émettant des rayons de très courte longueur d'onde et qu'on désire les séparer. On utilisera un filtre de verre Corex D dont la limite de transparence est théoriquement à 270 $m\mu$. En réalité, le Corex D absorbe une proportion importante de la radiation d'érythème. Pour déterminer grossièrement ce qu'il en est, on interposera une seconde plaque de Corex D ; le pourcentage d'absorption qu'elle causera après la première transmission, mesurera le pourcentage d'absorption due dans la même région à la première pièce de Corex D (figure 3).

Ce procédé qui, dans le cas de radiations d'une composition spectrale définie, donne des résultats comparables, ne s'applique pas à des sources de différentes compositions spectrales, car la transmission partielle d'un filtre peut affecter davantage une des sources que l'autre, dans le cas, par exemple, où l'on aurait affaire à une première source dont le maximum d'énergie est dans une région pour laquelle l'absorption du filtre est 80 pour cent et une seconde source qui a son maximum dans une région où l'absorption du filtre est seulement 40 pour cent. Il existe certaines substances qui ont, en solution, une bande de transmission comprenant la région d'érythème, ordinairement accompagnée par une autre bande de transmission dans le spectre visible. Parmi celles-ci, citons l'acide picrique, que l'on utilise avec un verre Corex pourpre pour couper le spectre visible (excepté une bande étroite dans le rouge foncé) et une plaque de Corex D pour couper l'ultra-violet de petites longueurs d'onde DORCAS et FORBES. — (Journal American Chemical Society 1927, p. 3081). Si on utilise ce filtre complexe avec une certaine cellule photoélectrique au sodium en quartz, on obtient une courbe de sensibilité très voisine de celle de l'érythème. En outre, cette cellule est complètement insensible au rouge qui est transmis par le filtre. Malheureusement, l'absorption de ce filtre est très grande dans la region de transmission et il serait désirable de trouver une meilleure combinaison.

Il a été quelquefois proposé d'utiliser un luxmètre pour doser l'ul-

tra violet, ce qui oblige d'admettre qu'il existe un rapport constant entre le flux lumineux et le flux ultra-violet. Non seulement ce rapport varie énormément quand il s'agit de sources différentes, lampes à vapeur de mercure en quartz, arcs à charbons de différentes compositions, lampes à arc à tungstène, mais encore il varie avec le temps pour une source donnée. Ce fait, qui avait été vérifié avec les lampes à vapeur de mercure en quartz qui, au bout de 800 heures, n'ont plus que des effets thérapeutiques très atténués, alors que leur flux lumineux a à peine diminué, existe également pour les lampes à arc de tungstène dans la vapeur de mercure qui viennent d'être créées.

TENDANCES RÉCENTES DES GRANDS TRANSPORTS D'ÉNERGIE AUX ÉTATS-UNIS (1)

par M. M. BARRÈRE

Ingénieur Conseil du « Matériel Electrique S. W. ».

1° *Mise à la terre du neutre haute tension*

La mise à la terre directe du neutre est encore la pratique fondamentale pour les hautes tensions aux Etats-Unis. Il y a eu quelques exceptions, particulièrement dans le cas de Centrales hydro-électriques, où l'on a introduit des réactances dans le neutre pour améliorer les conditions de stabilité lors de la mise à la terre d'une phase; cependant, en général, on peut arriver à un résultat satisfaisant dans ce cas, par l'emploi d'excitation rapide et de disjoncteurs rapides et cette méthode est préférable à celle de l'introduction de réactances dans le neutre ; celle-ci nécessite en effet des transformateurs plu coûteux avec isolement plus fort vers le neutre, tandis que l'isolement gradué; qui donne des résultats absoluments sûrs avec neutre direct à la terre, permet une forte économie.

Dans certains cas, par exemple dans la Southern California, les « impédors » ont été utilisés ; l'un des buts recherchés était de réduire le courant de terre, car, à cause de la grande résistivité du sol, il pouvait se produire des potentiels élevés dangereux pour la vie humaine.

Des bobines PETERSEN ont été proposées, mais n'ont pas rencontré une grande faveur aux Etats-Unis, car elles ne se sont pas montrées économiques, par rapport à l'emploi de fils de terre convenables, pour la protection des lignes.

2° *Protection des lignes et des postes contre la foudre.*

Certains essais ont été effectués avec des fils de terre disposés pour

(1) Communication présentée à la séance du 5 avril 1932, de la 4e Section du Comité d'administration de la Société française des Electriciens, sous la présidence de M. CARDON.

assurer la protection contre les coups de foudre directs (qui se sont montrés, beaucoup plus fréquemment dangereux pour l'exploitation que les tensions induites.)

Dans ces toutes dernières années, on a construit des lignes pratiquement immunisées contre les effets de la foudre ; la dernière est celle à 220 kV de Safe Harbur à Baltimore. Certaines portions de la ligne, entre Wallenpaupack et Siegfried (Pennsylvania Power and Light Company) ont été ainsi construites et, en particulier, la disposition suivant laquelle les fils de terre sont à 12,2 m au-dessus des conducteurs, aux pylônes, a été choisie sur une longueur de 3 milles sur la portion de la ligne d'interconnection reliant la sous-station de Plymouth Meeting (Philadelphia Electric C°) à celle de Roseland (Public Service Electric et Gas C°) du côté de Philadelphie.

Pratiquement, il ne semble pas que dans la plupart des cas, il soit économique de construire des lignes immunisées complètement, et on peut utiliser des distances moins grandes entre fils de terre et conducteurs; il est certain que les capitaux à dépenser dans ce but dépendent du prix des lignes, de la puissance qu'elles transportent et des perturbations apportées dans l'ensemble du réseau par les disjonctions de la ligne.

On estime que par exemple, pour une ligne double à 132 kV, il n'est pas économique de réduire le nombre d'interruptions par an et par 100 miles de ligne à moins de 1 ou 2.

D'autre part, l'efficacité des fils de terre dépend de la résistance de terre des pylônes ; lorsque le terrain ne permet pas de faibles résistances avec les moyens usuels, plaques de terre ou tubes de terre, on emploie des câbles enterrés, soit s'écartant radialement des pieds du pylône, soit parallèles à la ligne et réunissant les pylônes entre eux.

Un exemple du dernier cas d'emploi de « contrepoids » est la portion de la ligne Wallenpaupack Siegfried passant à High Knob ; l'impédance de choc des terres de pylônes de cette région était élevée et la protection des fils de terre très diminuée ; depuis l'installation du contrepoids, il n'y eut pas d'interruption dans cette partie (depuis 3 ans).

La méthode habituelle de protéger également les sous-stations par fils de terre, est à peu près générale et les charpentes métalliques sont souvent réunies à un câble enterré ; ceci est employé par la Public Service et Gas C° de New Jersey avec également contrepoids en lignes dans les régions où la nature du sol le nécessite.

Les parafoudres pour 220 kV étaient très discutés il y a quelques années, car on croyait (faussement d'ailleurs) que les surtensions en ligne étaient produites par induction et étaient limitées à des valeurs assez faibles par le contournement des chaînes, et par conséquent que les transformateurs isolés pour une tension de service 220 kV présentaient assez de sécurité.

Les expériences de la General Electric C° à Wallenpaupack ont montré que, pour les lignes non protégées, des parafoudres pouvaient être nécessaires pour les transformateurs. Depuis ce moment, la plupart des nouvelles installations de transformateurs à 220 kV ont été munies de parafoudres (Centrale hydro-électrique de Conowingo. sous-station de Plymouth Meeting, sous-station de Leaside de l'Hydro Electric Power Commission of Ontario, Centrale hydro-électrique de la Safe Harbor Power Corporation et sous-station correspondante de Baltimore).

A la station de Roseland de la Public Service Electric et Gas & C°, les transformateurs sont surisolés et évitent l'emploi de protections. Il y a une tendance actuelle, pour les tensions égales et supérieures à 110 kV, à ne pas employer de parafoudre et à le remplacer par un éclateur de protection, en construisant les transformateurs non résonnants, sauf dans les régions particulièrement exposées aux orages.

Il est à remarquer que, si la ligne et le poste sont convenablement protégés par fils de terre, un coup de foudre direct sur ces fils, à plus de 2 portées du poste, ne sera pas dangereux pour les transformateurs. Même avec le coup de foudre dans la dernière portée, la surtension sur les transformateurs sera faible (valeur de crête de l'ordre de 1 500 kV pour conditions les plus défavorables) et de très courte durée, la surtension étant diminuée par la capacité des transformateurs et l'apparition de l'effet corona sur les connexions du poste.

3° *Alternateurs entraînés par turbines hydrauliques.*

Au moyen d'amortisseurs de résistance convenable, on peut absorber (sous forme de pertes dans les amortisseurs) un excès d'énergie au moment où un court-circuit diminue la puissance électrique absorbée et empêcher le rotor de s'accélérer. La Westinghouse préfère des amortisseurs de forte résistance, lorsque la nécessité d'en adopter est prouvée.

Il est vrai que les amortisseurs en cuivre amortissent plus vite que ceux de forte résistance, les oscillations qui suivent un défaut; mais

ils n'opposent pas un couple aussi énergique à la première oscillation.

Une étude minutieuse a montré que si les amortisseurs, surtout ceux en cuivre, sont toujours utiles contre le « pompage », il est préférable de ne pas avoir d'amortisseurs ou d'en employer de forte résistance, pour combattre la première oscillation après un défaut. L'absence d'amortisseurs conduit à une réactance de séquence négative plus grande et par conséquent à une augmentation de la puissance syncronisante en cas de défauts ; cependant, les amortisseurs de forte résistance, malgré la puissance synchronisante plus faible, absorbent assez d'énergie pour faire plus que contrebalancer l'effet précédent.

Avec des amortisseurs de faible résistance, le court-circuit est augmenté et le choc initial est plus fort que sans amortisseurs ; le travail des disjoncteurs est accru sans qu'il en résulte d'amélioration suffisanté pour la stabilité.

L'effet des amortisseurs sur l'excitation rapide est peu important, quoique leur effet soit de s'opposer aux variations de flux. Les alternateurs fournis par la Westinghouse pour Fifteen Miles Falls (New England Power C°) sont munis d'amortisseurs doubles (un circuit à forte résistance et un circuit en cuivre).

L'excitation rapide est devenue une pratique standard pour les alternateurs de centrales hydrauliques aux Etats-Unis ; la vitesse de réponse maximum qu'il est pratiquement nécessaire de prévoir est celle qui permet de maintenir à une valeur à peu près constante la tension interne des machines, car la vitesse de montée de la tension d'excitation ne mesure pas à elle seule l'effet d'excitation rapide. La tension à l'alternateur n'est pas en effet directement proportionnelle à la vitesse de montée de tension d'excitatrice. Généralement, une montée de 1 200 V par seconde donne pratiquement à peu près le même résultat qu'une vitesse infinie ; cependant, les caractéristiques des machines et du réseau sont à examiner pour déterminer la meilleure vitesse à donner.

Pour les compensateurs synchrones, ceux de Plymouth Meeting de la General Electric C° peuvent augmenter leur débit de 5 000 à 30 000 kVA en avant en 0,3 s et ceux de West Moreland (Westinghouse) en 0,45 s, (d'après la situation de ces dernières machines, l'exploitant n'avait pas cru devoir demander davantage).

Au sujet du rapport de court-circuit (entendu comme le rapport des ampères-tours à vide aux ampères-tours en court-circuit) la valeur normale est d'environ 1,25 ; lorsque le courant de capacité de la ligne est peu important, on descend à 0,9 à 1. Cependant, dans un cas spécial

au Japon, on a été amené à adopter 2. La réactance transitoire pour les gros alternateurs à pôles saillants varie de 22 à 40 pour cent avec tendance à rester vers la limite inférieure pour raison de stabilité, tandis que pour les transformateurs correspondants on adopte de 8 à 10 pour cent.

Ainsi que nous l'avons dit plus haut, on emploie toujours des régulateurs de tension pour les alternateurs de centrales hydro-électriques, tandis que dans les puissantes centrales thermiques de New-York, Philadelphie, Boston, Chicago, on n'en utilise pas ; mais les pendules Warren pour régulation de la fréquence (et distribution électrique de l'heure) y sont installées. Le rapport de court-circuit pour les turbos est d'environ 0,8 à 1.

L'application de conduites de gaz carbonique commandées par cellules photo-électriques ou relais différentiel s'étend pour les centrales hydro-électriques.

Enfin, le rendement des gros alternateurs à pôles saillants des 2 dernières années atteint toujours environ 97 pour cent à pleine charge et cos φ : 0,9, toutes pertes comprises et pour le dernier compensateur synchrone de 75 000 kVA, le rendement garanti est de 98,3 pour cent à pleine charge.

DISCUSSION

Observations de M. J. Fallou.

L'opinion actuellement formulée par le constructeur américain au sujet de la mise à la terre du neutre, et que M. Barrère vient de nous rapporter, me paraît un peu trop dogmatique et mérite d'être discutée.

Le seul avantage invoqué en faveur de la mise à la terre directe du point neutre consiste à réaliser une certaine économie sur le prix d'achat des transformateurs qui peuvent alors être construits avec un isolement décroissant progressivement depuis les bornes d'entrée jusqu'au point neutre.

Je crois qu'il ne faut pas s'exagérer l'importance de l'économie ainsi réalisée : la différence entre le prix d'un transform particulier le dis-
à isolement gradué, et celui d'un transformateur de la General Elec-
dont le neutre est isolé pour 100 kV ne dépasse guère 15 pour cent.

Dans la majorité des cas, ce supplément de dépenses sera bien faible vis-à-vis du prix total de tous les dispositifs que l'on installe dans les grands transports d'énergie à haute tension — à juste titre d'ailleurs — pour en améliorer la continuité de service : compensateurs synchrones et alternateurs à excitation rapide, disjoncteurs et relais ultra-rapides, augmentation de l'isolation des lignes et des postes, etc...

Et pourtant, la mise du neutre à la terre par l'intermédiaire d'une impédance constitue certainement le remède le plus efficace contre les causes les plus fréquentes d'instabilité. Une telle impédance résout d'elle-même le problème tant que les avaries se limitent à la mise à la terre d'une phase, puisqu'elle limite ou annule même les chutes de tension concomitantes ; mais de plus, puisqu'elle réduit ou annule le courant dans l'arc à la terre, elle diminue considérablement les risques d'extension de cet arc vers les phases voisines, et par conséquent les probabilités du court-circuit polyphasé, si redoutable pour le maintien de la stabilité.

On a souvent tendance à opposer, comme deux doctrines concurrentes, d'une part l'emploi de disjoncteurs ultra-rapides et d'autre part l'installation d'impédances sur le neutre. Il me semble que ces deux doctrines ne sont pas contradictoires et qu'elles peuvent coexister : l'impédance de neutre est un remède préventif contre les répercussions multiples de la mise à la terre accidentelle d'une phase, et le disjoncteur ultra-rapide permet encore de sauver la stabilité dans les cas toujours possibles (mais rendus certainement plus rares par l'impédance de neutre) où les courts-circuits atteignent plusieurs phases.

Il me paraît qu'à l'heure actuelle, où l'on peut profiter d'une expérience déjà longue de certains réseaux américains (Southern California Edison C° par exemple), il ne soit plus permis d'engager l'avenir des réseaux en construction ou en projet en leur imposant *définitivement* — par la construction de leurs transformateurs — de fonctionner avec le point neutre directement au sol. Même en mettant à part tous les avantages d'exploitation que procure une impédance dans la connexion neutre, il faut songer que l'extension de ces réseaux rendra fatalement, quelque jour, impossible leur exploitation avec tous les points neutres reliés simultanément à la terre, ne serait-ce qu'à cause du développement excessif des courants de court-circuit et des interférences avec les lignes de télécommunication.

Remarques de M. G. Darrieus

[illegible] serait regrettable que l'insertion de réactances dans le neutre qui

n'est qu'un pis aller, dut faire renoncer à la solution rationnelle que constitue l'isolation graduée, car celle-ci est non seulement économique, mais encore favorable au rendement et même à la sécurité de service quand elle s'allie, comme c'est le cas naturellement, au mode de construction non-résonnant. Une forme intéressante en est celle introduite récemment par la Westinghouse, également dans le mode d'exécution cuirassé. Si elle tend à augmenter la réactance, l'effet en est précisément de pallier au danger de courants de court-circuit trop élevés, dans tous les cas, et non plus seulement lors de la mise à la terre d'une seule phase, étant entendu que, comme le confirment encore des résultats d'exploitation récents, la sauvegarde complète du réseau doit toujours être cherchée dans la disjonction rapide que permettent de mieux en mieux les relais et interrupteurs modernes.

Du même point de vue, les solutions d'excitation rapides ont déjà perdu, et sont surtout destinées à perdre beaucoup de leur intérêt, dès l'instant que, dans le temps de plus en plus court qui leur est alloué, le rôle principal et indispensable que jouent aux premiers instants du régime variable les amortisseurs et le circuit fermé inducteur, à l'égard d'une conversation spontanée du flux, tendra le plus en plus à se montrer suffisant.

En ce qui concerne le rapport de court-circuit des alternateurs, s'il ne dépend que de l'exploitant d'avoir des machines à pôles saillants de rapport inférieur à 0,9, plus légers et de meilleur rendement, la valeur correspondante pour les turbo-alternateurs est en Europe toujours bien inférieure, et de l'ordre par exemple de 0,3 pour des machines de 50 000 kVA.

Remarques de M. J. Saint-Germain

M. Barrère, ayant parlé de la nécessité, pour éviter des décrochages, d'utiliser des disjoncteurs rapides et M. Fallou ayant indiqué que ces disjoncteurs étaient coûteux par rapport aux appareils ordinaires, M. de Saint-Germain a fait remarquer que l'on avait commencé, pour obtenir de grandes vitesses de coupure, par munir les appareils de forts ressorts augmentant la rapidité du mouvement des contacts mobiles ; cela conduisait à des appareils difficiles à construire et nécessitant un mécanisme extrêmement robuste avec des servo-moteurs de commande très puissants ; mais, depuis quelque temps, d'autres procédés de coupure rapides ont été mis au point et en particulier le dispositif des chambres d'explosion à jet d'huile de la General Electric C°.

Avec ces dispositifs, les durées d'arcs sont considérablement réduites, sans qu'il soit nécessaire de rien modifier au mécanisme ni à l'organe de commande des appareils. De plus, il est évident que cette diminution de la durée des arcs réduit la quantité de gaz formée pendant la coupure et diminue par conséquent, dans une grande proportion la contrainte subie par les appareils pendant la coupure.

Au sujet de l'emploi des parafoudres pour tensions de 110 kV et au-dessus, M. de SAINT-GERMAIN fait remarquer que s'il y a, en Amérique, une tendance à protéger les transformateurs par des éclateurs, cela n'exclut, en aucune façon l'emploi des parafoudres.

Si l'éclateur fonctionne sous l'effet d'une surtension arrivant sur le transformateur, il en résulte un court-circuit et le déclenchement des disjoncteurs. Si, en amont de l'éclateur, un bon parafoudre est installé, ce sera l'éclateur du parafoudre qui fonctionnera et tout déclenchement intempestif sera évité puisque le parafoudre écoulera l'énergie de la surtension sans provoquer de court-circuit.

Si l'on veut donc éviter tout déclenchement inutile, l'emploi de parafoudre s'impose toujours ; mais l'éclateur sera alors le juge du parafoudre ; s'il fonctionne, c'est que le parafoudre n'aura pas fait son devoir.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

Production

Barrages conjugués et installation de pompages Par Georges Laporte, ancien élève de l'Ecole Polytechnique 1 volume broché 17 × 26 cm, de 144 pages 20 figures pour 35 fr). Edité par la librairie Gauthiers-Villars, 55 quai des Grands-Augustins. Paris 1932 (Don de l'éditeur)

Ce volume est consacré à l'étude des problèmes relatifs aux installations de pompage destinées à des centrales hydro-électriques.

Appareillage. — Canalisations

Table pour le calcul des conducteurs à haute tension, longueur allant jusqu'à 1000 km., avec une courte théorie. William Rung, Professeur à l'Ecole supérieure technique royale de de Kopenhague. Une brochure A n° 30, 12 × 18,5 cm, de 30 pages de 6 graphiques et 5 nomogrammes hors texte Edité par la Danmark Naturvidenskabelige Samfund, 1 kommission Hos G.E.C. Gad. Vimmelslcaftet 32. Copenhague (1931). — Don des éditeurs.

L'auteur établit les équations du courant et de la tension avec graphiques correspondants. Il détermine la grandeur des corrections en se servant de la méthode des imaginaires. Il étudie ensuite la précision du procédé, la régulation de la tension par variation de la puissance réactive, les pertes et rendements. Il termine par un exemple numérique.

Au fascicule sont adjoints 5 nomogrammes :
1° Réactance et admittance d'un conducteur simple pour 50 p:s
2° les constantes de correction m et n
3° L'angle de correction $\Delta\varphi$, φ_k et φ_0,
4° la résultante des deux vecteurs.
5° l'angle de phase de la résultante des 2 vecteurs.

Transformateurs de mesure et Relais de protection, par C. Bresson, Ingénieur aux Ateliers de Delle. Un volume de 293 pages, 16×25 cm., 199 figures. Edité par Dunod, 92, rue Bonaparte, Paris (VI^e) (Don de l'éditeur)

La première partie de l'ouvrage traite des transformateurs de mesure. L'auteur en donne les théories élémentaires ainsi que les mesures relatives à ces appareils. Il aborde ensuite le problème de leur isolement et donne quelques détails sommaires sur chacun des types de transformateurs, classés d'après la nature de leur isolement. Il termine par l'étude des effets des surintensités qui se produisent dans les transformateurs de mesure.

Dans la seconde partie l'auteur étudie d'abord les effets des défauts de fonctionnement dans un réseau. Puis il donne le principe et la description des principaux déclencheurs et relais de protection : déclencheurs et relais à maxima d'intensité déclencheurs et relais de tension relais wattmétrique relais différentiel de courant d'impédance, etc.

Il termine par l'étude de la protection des génératrices, des transformateurs, des barres omnibus et enfin des réseaux par les relais décrits.

TRANSMISSIONS PAR ONDES

Déviations radiagoniométriques à bord d'avion, par E. FROMY, Docteur ès-Sciences. Publications Scientifiques et Techniques du Ministère de l'Air. Service des Recherches de l'Aéronautique. 1 brochure n° 1032, de 19 × 27 cm, de 45 pages, 12 figures. Éditée par GAUTHIER VILLARS, 55 quai des Grands-Augustins, Paris (1932). Don de l'éditeur.

Cette brochure traite les question suivantes :

Calcul du champ perturbateur, Étude de l'erreur goniométrique, discussion, Résultats pratiques. Vérifications expérimentales, Compensation de l'Erreur goniométrique.

UNITÉS. — MESURES

The Present Status of the Magnetic-Circuit Units. Le statut actuel relatif aux unités du circuit magnétique, par Dr Arthur E. KENNELLY Une brochure n° 1036 de 19 × 27 cm, de 25 pages. Éditée par Denki-Gakkoway (Institut des Ingénieurs Électriciens du Japon), à Tokio (Japon), novembre 1931. (Don des éditeurs).

Cette brochure traite les questions suivantes, relative aux unités de circuit magnétique.

Historique des 40 dernières années, unités magnétiques C. G. S., relations entre ces unités et les unités pratiques, différents systèmes d'unités (systèmes rationnalisés et irrationnalisés).

Souflerie Aérodynamique à dynanomètres électrométriques, par P. REBUFFET licencié ès-Sciences, Ingénieur E. S. E. — Préface de M. A Aîayrac Inspecteur. général de l'Aéronautique. Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'Air, Service des recherches de l'aéronautique. 1 brochure n° 1031, de 19 × 28 cm . de 123 pages, 82 figures. Éditée par GAUTHIERS-VILLARS, 55 Quai des Grands-Augustins. Paris (1932). — Don de l'éditeur.

Cette brochure traite les questions suivantes :

Généralités sur la soufflerie, caractéristique de la buse, exploration de la veine, étude et mise au point des appareils de mesure des efforts équipement, de la balance de la petite soufflerie avec les dynanomètres électrométriques, étude de la suspension à fils, mesure de la vitesse.

MATHÉMATIQUES

Le calcul des différences finies et ses applications, par Alfred HENRY. Membre de l'Institut des actuaires de Londres traduit de l'anglais par Sallin. Un volume 16 × 25 cm, de 212 pages Édité par Hermann et Cie, 6, rue de la Sorbonne, Paris — Don de l'éditeur.

L'ouvrage s'adresse plus spécialement aux actuaires des compagnies d'assurance, et des sociétés de capitalisation pour lesquels il a été écrit mais peut rendre également de grands services aux Ingénieurs, aux Physiciens, aux Chimistes, etc...

Dans la première partie l'auteur donne les principes qui permettent de traiter les problèmes les plus importants qui se présentent dans la pratique : interpolations (interpolation directe et interpolation inverse), sommation des séries, etc...

Dans la seconde partie de son œuvre, l'auteur donne les premiers éléments de calcul différentiel et établit la relation qui existe entre le calcul différentiel et le calcul des différences finies. Il termine par l'application des méthodes du calcul intégral à la résolution des problèmes sur les probabilités.

Les principes sont illustrés par de nombreux exemples traités dans tous leurs détails et un grand nombre d'exercices suivis de leurs réponses servent d'application à la matière de chaque chapitre.

FORMULAIRES. — MANUELS

Traité de soudure autogène et d'oxy coupage, par R. Grandjon et P. Rosemberg. 1 brochure n° 1029, 14 × 22 cm de 306 pages, 248 figures. Prix 15 francs, Edition générale publiée par l'Office Central de l'Acétylène et de la Soudure autogène, 104 boulevard de Clichy, Paris (1928). — Don de l'éditeur.

Cette brochure traite les questions suivantes : 1re partie Notions générales, différents procédés d'assemblage Oxygène, carbure de calcium, acétylène, chalumeaux oxy-acétyléniques, qualités et défauts des soudures, méthodes de soudure Etudes des métaux et alliages au point de vue de leur soudabilité.
La 2e partie est consacrée à l'oxy-coupage.

Notions pratiques de soudure autogène oxy-acétylénique et d'oxy coupage. par M. R. Meslier, chef des travaux à l'Office Central de la soudure autogène. 1 brochure n° 1028 de 14 × 22 cm, de 112 pages, 100 figures. Publiée par l'Office Central de la Soudure autogène, 32 Boulevard de la Chapelle, Paris. — Don des éditeurs.

Cette brochure traite les questions suivantes :
Définition de la soudure autogène. Matériel employé et différents procédés.
En annexe, 50 questions et problèmes de la pratique, avec leurs réponses.

La soudure électrique à l'arc et ses applications, par M. Maurice LEBRUN, Ingénieur A. et M., Lauréat de l'Institut. Préface de M. Léon Guillet, membre de l'Institut 1 brochure n° 1027, de 14 × 21 cm., de 247 pages, 210 figures Editée par l'Office Central de l'Acétylène et de la Soudure autogène, 32 boulevard de la Chapelle, Paris (1931) — Don des éditeurs

Cette brochure traite les questions suivantes :
Notions d'électricité, soudure électrique à l'arc et découpage des métaux, contrôle et essais de soudures. Caractéristiques des électrodes. Description du matériel de soudure électrique à l'arc. Applications de ce mode de soudure.

COMMÉMORATIONS

Report on the Faraday celebrations : Compte rendu de la célébration du centenaire de Faraday (1931). 1 brochure n° 1037 de 14 × 22 cm de 72 pages Editée par la Royal Institution of Great Britain. 21 Albemarle Street, London (1932). Don de la Royal Institution.

Cette brochure donne un compte rendu détaillé des cérémonies qui eurent lieu à Londres à l'occasion du centenaire de Faraday. On donne, en annexe, la liste des délégués qui s'y trouvaient.

IL Y A TRENTE ANS

Réunion ordinaire mensuelle du 18 juin 1902.

Présidence de M. E. Harlé.

Des 4 Membres élus dans cette séance, nous comptons encore parmi nous M. Lestrade, M. P. Rodier, la *Société Parisienne pour l'industrie des chemins de fer et des tramways électriques.*

M. A. Heyland présente une communication sur les *Alternateurs autoexcitateurs types d'induction.*

Le conférencier décrit le système de compensation pour les machines d'induction asynchrones, dont il revendique l'invention. La seconde partie de l'étude est consacrée au compoundage des machinec contre des charges inductives.

M. Boucherot, sur l'invitation du Bureau de la Société, donne son avis sur la valeur technique des procédés et dispositifs décrits par MM. Latour et Heyland : il s'agit en l'espèce d'une seule et même machine ayant comme stator un induit d'alternateur et comme rotor un induit de dynamo à courant continu. M. Boucherot ajoute quelques calculs théoriques pour montrer comment la machine est essentiellement asynchrone.

M. Janet expose comment on peut, par un calage judicieux des balais, établir la concordance des phases entre les tensions induites à vide aux bornes du stator et les tensions d'excitation supposées entretênues séparément entre balais.

M. Latour développe des considérations pour démontrer qu'il n'y a aucune différence entre son moteur et le moteur Heyland, et la discussion est close après les observations de MM. Korda, Jean Rey, Hospitalier et Heyland.

BAR-LE-DUC. — IMP. COMTE-JACQUET. *Le gérant* : Alfred Magnier.

5e série, tome II, n° 20 Août 1932

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

---

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

COMPTE RENDU DES RÉUNIONS

RÉUNION ORDINAIRE MENSUELLE

du Mercredi 1er Juin 1932

Présidence de M. ULRICH.

La séance est ouverte à 20 h. 45.

Le procès-verbal de la précédente séance est adopté.

Il est donné connaissance des demandes d'admission suivantes :

MM.

Altovsky (Vladimir), élève à l'E. S. E., 2, rue Boulard, à Paris (14e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Bruart (Jean-Edmond-Louis-Joseph), élève à l'E. S. E., 7, rue Coste-et-Bellonte, à Viroflay (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Caillart (Marcel), ingénieur aux Forges et Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont, à Jeumont (Nord). — Présenté par MM. Lejeune et Douchet.

Carton (Ernest), ingénieur aux Forges et Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont, à Jeumont (Nord). — Présenté par MM. Fournier et Langlois-Berthelot.

Chalmey (Lucien), ingénieur à l'Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'énergie électrique, 26, rue de la Baume, à Paris (8e). — Domicile : 219, rue de la Croix-Nivert, à Paris (15e). — Présenté par MM. Brylinski et Janet.

Chevalier (René-Paul), ingénieur aux Forges et Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont, 2", rue de Binche, à Jeumont (Nord). — Présenté par MM. Lejeune et Douchet.

De Coppet (André), ingénieur aux Forges et Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont, 14 *bis*, rue de la Place, à Jeumont (Nord). — Présenté par MM. Fournier et Langlois-Berthelot.

Curto (Louis), ingénieur à la Compagnie Electromagnétique, rue Regnault, à Pantin ; domicile : 3, avenue de l'Aigle, Pré-Saint-Gervais (Seine). — Présenté par MM. Chaumat et Faust.

Defosse (Armand-Lucien), ingénieur chef de service des essais aux Forges et Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont, 68, rue Gambetta, à Jeumont (Nord). — Présenté par MM. Lejeune et Douchet.

Dehesdin (André-Fernand-Paul), élève à l'E. S. E., 45, avenue Augustin-Dumont, à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Etablissements Phillips et Pain (Protection contre l'Incendie), 80, avenue des Moulineaux, à Billancourt (Seine). — Présenté par MM. Boulouvard et Lecorguillier.

Fourquet (Pierre-Joseph), ingénieur aux Forges et Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont (Nord). — Présenté par MM. Fournier et Langlois-Berthelot.

Galzin (Louis), ingénieur aux Forges et Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont, 2, rue de Binche, à Jeumont (Nord). — Présenté par MM. Lejeune et Langlois-Berthelot.

Girerd (Robert-Paul), élève à l'E. S. E., 46, rue de Vaugirard, à Paris (6e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Goudard (Lucien-Adrien), ingénieur à la Société des Etains de Kinta à Kampar (Etats Fédérés Malais). — Présenté par MM. Chaumat et Faust.

Guillou (Yves-Henri), ingénieur A. et M., élève à l'E. S. E., 45, avenue Augustin Dumont à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Macaire (Victrice-Louis-Jules), général de division, inspecteur permanent des fabrications du génie, ingénieur E. S. E., 45, rue du Sud, à Versailles (Seine-et-Oise). — Présenté par MM. Grosselin et Chaumat.

Martin (André-Léon), ingénieur A. et M., élève à l'E. S. E., 2, rue Béranger, à Malakoff (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Perrichon (Albert-Jean-Marie), élève à l'E. S. E., 1, place Etienne Jarousse à Vanves (Seine). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Piette (Gabriel), ingénieur aux Forges et Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont, 49, rue Puissant, à Jeumont (Nord). — Présenté par MM. Fournier et Langlois-Berthelot.

Rabinovitch (Michel), élève à l'E. S. E., 35 et 37, rue Le Marois, à Paris (16e). Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Roux (Robert), directeur « Accu Watt », 24, rue du Château d'Eau, à Bordeaux (Gironde). — Présenté par MM. Ledieu et Duco.

Savtchenko (Serge), ingénieur I. T. N. et E. S. E., 4, rue de l'Amiral Roussin, à Paris (15e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Torcheux (Emile-Léon-Gabriel), élève à l'E. S. E. 16, rue de Staël, à Paris (15e). — Présenté par MM. Janet et Guilbert.

Sans opposition de la part des membres présents, ces candidats sont élus Membre titulaire de la Société.

M. Dauvillier, Docteur ès sciences, Membre de la Mission française de l'Année Polaire, présente une communication sur les « *Recherches de physique cosmique : aurores polaires et rayons cosmiques* » (1).

Il présente d'abord des vues d'aurores polaires dues à un peintre danois H. Moltke et qui représentent, avec une rare exactitude de coloris et de dessin, les aspects si divers du phénomène.

Il donne ensuite une interprétation synthétique des phénomènes électromagnétiques produits sur la terre par le rayonnement électronique du soleil, phénomènes dont les aurores constituent un effet secondaire. Il considère les arcs auroraux comme des portions de couronnes lumineuses circulaires, centrées sur l'axe magnétique de Gauss et faisant le tour du globe ; ces couronnes elles-mêmes sont la projection, selon les lignes de force magnétique du champ terrestre, des géodésiques décrites par les électrons solaires sur les tubes de force magnétique. Ces électrons primaires gravitent à une altitude de l'ordre du rayon terrestre et s'échappent sans charger le globe. Les électrons secondaires, de très faible énergie, émis par impact sur les gaz de la haute atmosphère, décrivent, à leur tour, des géodésiques de très petit rayon de courbure. Quelques-uns se dirigent vers la terre ; la limite de

(1) Cette communication a été exposée en trois articles publiés dans la *Revue générale de l'Electricité* des 5 mars, 2 et 9 avril 1932, t. XXXI.

leur parcours, qui marque l'altitude du bord inférieur net des arcs auroraux (100 km) mesure leur pouvoir de pénétration et leur énergie, qui est de l'ordre de quelques dizaines de kilovolts-électrons. Les différents arcs concentriques, qui représentent le phénomène fondamental de l'aurore polaire, représentent ainsi les diverses « raies » du spectre magnétique terrestre des électrons solaires.

Les orbites polaires des électrons solaires dans le champ magnétique terrestre sont invisibles, mais leur rayon de courbure est relié à celui des arcs auroraux et l'on peut ainsi calculer l'énergie de ces électrons, qui correspond à 10^{10} volts électrons.

Les orbites équatoriales et non polaires donnent naissance, en tout point où la composante verticale du champ magnétique terrestre n'est pas nulle, à l'aurore non polaire de Lord RAYLEIGH.

L'estimation de la brillance du ciel nocturne permet d'évaluer l'énergie dépensée par les électrons solaires dans la haute atmosphère : celle de la brillance des arcs polaires faite par le conférencier en Laponie finlandaise, montre que les orages auroraux, phénomènes accidentels, mettent en jeu mille fois moins d'énergie que l'aurore permanente. La phosphorescence de l'aurore et la production d'ozone sont attribués à l'action des électrons secondaires sur les gaz de la stratosphère; les aspects complexes des orages auroraux sont des effets secondaires dus aux vents d'origine électromagnétique dans la haute stratosphère.

Le conférencier a pu effectuer la synthèse de l'aurore au moyen d'un faisceau d'électrons de quelques centaines de volts ; les trajectoires primaires et secondaires étant rendues visibles par leur trace dans une atmosphère de néon raréfié.

Dans les régions polaires, les phénomènes auroraux apportent, à la base de la stratosphère, des ions négatifs, tandis que, dans la région équatoriale éclairée, l'ionisation, due au rayonnement ultra-violet solaire, provoque un excès d'ions positifs. Des courants telluriques superficiels ferment le circuit dans l'hémisphère éclairé, en suivant le méridien magnétique.

Les rayons cosmiques seraient des rayons Röntgen produits par l'impact des électrons solaires sur les gaz de la haute atmosphère et dont le quantum maximum est dix fois moindre que l'énergie des électrons solaires, par suite de la diffusion dans la troposphère.

Le globe étant presque complètement entouré d'une enveloppe de trajectoires primaires, polaires et équatoriales, à une altitude de l'ordre de grandeur de son rayon, le ciel tout entier paraîtra être la source de rayons cosmiques. Le calcul montre qu'un orage auroral — magné-

tique — tellurique n'accroît l'intensité des rayons cosmiques que d'une quantité de l'ordre du millième. La preuve de l'origine des rayons cosmiques ne pourra d'ailleurs être donnée que par la mise en évidence de la période solaire undécennale.

L'énergie des électrons émis par le soleil s'explique, si l'on considère que les facules solaires sont de la nature du spot cathodique (de l'arc au mercure) et donnent naissance à des électrons lents qu'accélère radialement le champ électrique de la chromosphère ; les électrons solaires peuvent facilement y acquérir une énergie de l'ordre de 10^{10} volts-électrons. Déviés par le champ magnétique externe, et grâce à la lumière qu'ils diffusent, ils produisent l'apparence de la couronne solaire.

Cette émission nécessite un mécanisme compensateur qui est fourni par l'émission de jets d'ions positifs constituant les protubérances solaires, associées aux plages faculaires. L'estimation de la densité du flux électronique solaire au niveau de notre globe permet le calcul de la perte de masse subie par le soleil du fait de ces éruptions et le résultat (10^6 t:s) est du même ordre de grandeur que la perte de masse due au rayonnement thermique.

Les jets coronaux, par suite de la rotation du soleil, balayent le plan de l'écliptique à la vitesse tangentielle de 400 km:s. L'ensemble de ces jets, rendus visibles par la lumière solaire qu'ils diffusent, constitue la lumière zodiacale. Un jet qui s'approche de la terre l'aimante, puis la désaimante quand il l'a dépassée, mais l'écorce argileuse ferro-magnétique conserve au globe un léger magnétisme rémanent. C'est l'origine du magnétisme terrestre.

Si la terre ne contenait pas de fer, le bombardement causé par les électrons solaires y rendrait la vie impossible.

Au cours de cette conférence ont été projetés des clichés d'arcs auroraux, de phosphorescence post-aurorale et de la couronne solaire. Le conférencier annonce en terminant qu'il va hiverner au Groenland avec la mission française de l'Année Polaire pour continuer ses observations.

M. le Président remercie M. Dauvillier en ces termes : Mes chers collègues, vos applaudissements montrent l'intérêt que vous avez pris à l'exposé magistral que M. Dauvillier vient de nous faire de sa théories des aurores polaires, théorie dont il est allé recueillir les éléments sur place. Il nous a élevés pour quelques instants au-dessus du niveau de nos préoccupations habituelles et nous serons très heureux de l'en-

tendre de nouveau au retour de la nouvelle mission pour laquelle il part.

« Dès maintenant, je le remercie et je le félicite vivement de la belle communication qu'il vient de nous faire. »

La séance est levée à 23 heures.

ERRATUM

Prière de vouloir bien noter :

Bulletin de Juin 1932 — *Rapport du Comité d'Administration à la page* 567 — *distinctions honorifiques :* Prière de vouloir bien ajouter parmi le nom des Chevaliers de la Légion d'honneur, celui de M. C. Cheneveau, Docteur ès-sciences.

PROPAGATION DES COURANTS DE HAUTE FRÉQUENCE POLYPHASÉS LE LONG DES LIGNES AÉRIENNES DE TRANSPORT D'ÉNERGIE AFFECTÉES DE COURTS-CIRCUITS OU DE DÉFAUTS D'ISOLEMENT

APPLICATION A LA PROTECTION SÉLECTIVE DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

par M. J. Fallou

Introduction. — Equations générales des courants et des tensions le long d'une ligne triphasée en régime déséquilibré. — Justification théorique de l'emploi des équations de Kirchhoff. — Mesure des impédances caractéristiques et des constantes de propagation sur une ligne à 220 kV. — Calcul des courants à l'origine et à l'extrémité d'une ligne affectée de courts-circuits ou de défauts d'isolement. — Application à la protection sélective des réseaux électriques.

INTRODUCTION

L'étude du fonctionnement des réseaux polyphasés en régime déséquilibré a fait un pas décisif depuis la mise au point de la théorie dite des coordonnées symétriques, dont on trouve les premiers éléments dans une note présentée à l'Académie des Sciences en 1914 par M. Louis Stokvis (1), et son complet développement dans le mémoire aujourd'hui célèbre qu'a publié Fortescue en 1918 (3).

La décomposition de n vecteurs quelconques en $(n - 1)$ systèmes polyphasés équilibrés et 1 système de vecteurs équipollents ou homopolaires, à laquelle conduit cette théorie, a pu être considérée pendant longtemps comme un simple artifice de calcul facilitant la résolution des problèmes d'électrotechnique chaque fois qu'une dissymétrie systématique ou accidentelle se manifeste dans un appareil ou dans un réseau polyphasé.

Ce procédé permet effectivement de ramener à la résolution d'un ensemble d'équations très simples la solution de problèmes apparemment complexes, et a trouvé des applications immédiates, par exemple

(1) N. B. Les nombres entre parenthèses renvoient à la bibliographie.

pour le calcul des courants de courts-circuits dissymétriques (3), et pour l'étude de la stabilité des lignes de transport d'énergie soumises à des défauts d'isolement. Nous avons eu l'occasion de montrer, en outre, qu'il permet d'aborder très aisément l'étude des régimes transitoires dans les réseaux polyphasés, dans le cas où une cause de déséquilibre rend extrêmement laborieuse la mise en équation du problème et sa solution par les méthodes directes (4).

Au point de vue des applications aux calculs des réseaux, la décomposition des vecteurs en leurs composantes polyphasées symétriques tire son principal avantage du fait qu'elle permet de substituer à un réseau très complexe — comportant à la fois des self-inductances, des mutuelles inductances entre phases, des capacités branchées entre phases et entre phases et neutre — la superposition d'un nombre restreint de réseaux beaucoup plus simples dans lesquels il ne reste à considérer que des selfs-inductances et des capacités fictives faciles soit à calculer, soit à mesurer directement par des procédés élémentaires.

Mais quoi qu'il en soit de ces avantages d'ordre purement mathématique, nous pensons que le principal intérêt de la théorie des coordonnées symétriques réside surtout dans le fait qu'elle correspond bien à une réalité physique susceptible d'applications pratiques. Les composantes symétriques d'un système de tensions ou de courants déséquilibrés peuvent, en effet, se mesurer directement et indépendamment les unes des autres; chacune d'elles se comporte différemment des autres suivant la constitution du réseau et suivant la nature des appareils qui sont en jeu ; aux composantes de même ordre des courants et des tensions correspondent des composantes de la puissance, qui sont directement mesurables et qui se manifestent de manières différentes ; en particulier, le long d'une chaîne d'impédances constituant un réseau triphasé, la composante directe ou synchrone a sa source au sein des génératrices synchrones ou asynchrones, tandis que les composantes inverse et homopolaire sont engendrées à l'origine du déséquilibre et se propagent vers tous les éléments équilibrés du réseau, qu'ils soient générateurs ou récepteurs de puissance normale.

Nous croyons avoir indiqué pour la première fois il y a quelques années, cette propriété essentielle (5), au moins dans le cas de circuits à constantes non uniformément réparties, et nous avons déjà basé sur elle certains systèmes de protection sélective qui sont exploités dans plusieurs réseaux de transport et de distribution (6). Nous aurons l'occasion, au cours du présent travail, de généraliser cette notion aux longues lignes à constantes réparties.

Nous croyons donc que les composantes symétriques des courants des tensions et des puissances, correspondent à des réalités objectives appelées à jouer, dans un certain nombre d'applications pratiques, un rôle extrêmement important, analogue, par exemple, à celui que joue déjà — dans un autre ordre d'idées — la puissance réactive par rapport à la puissance réelle.

En définitive, l'application de la théorie des coordonnées symétriques à l'électrotechnique n'est donc pas seulement destinée à faciliter la solution mathématique d'un grand nombre de problèmes, mais constitue certainement une source féconde d'inventions nouvelles ; l'un de ses principaux champs d'application — d'ailleurs déjà largement exploré — est sans doute celui de la protection des réseaux contre les défauts d'isolement accidentels.

Le présent travail a précisément pour but de démontrer les possibilités de réalisation d'un nouveau système de protection, basé simultanément sur l'emploi des courants de haute fréquence polyphasés superposés aux courants de travail le long des lignes de transport d'énergie, et sur les propriétés que possèdent certaines composantes symétriques de ces courants de haute fréquence lorsque la ligne protégée est le siège d'un court-circuit ou d'un défaut d'isolement.

Dans ce travail, nous aurons donc à étudier tout d'abord la manière dont on peut calculer les courants et les tensions le long d'une ligne longue polyphasée parcourue par des courants de haute fréquence, en régime dissymétrique. Cette première étude nous conduira à aborder le problème du retour par le sol des courants alternatifs, et à comparer aux théories récemment proposées pour résoudre ce problème les résultats que nous ont fourni une série d'expériences effectuées sur une longue ligne de transport d'énergie.

Nous pourrons alors déterminer les valeurs des composantes symétriques des courants et des tensions à l'origine et à l'extrémité d'une ligne affectée d'un défaut d'isolement ou d'un court-circuit, ce qui nous permettra d'énoncer un certain nombre de théorèmes très importants relatifs à la propagation sans onde de retour des composantes inverse et homopolaire.

Enfin, ces résultats théoriques et expérimentaux étant établis, nous pourrons décrire leur application pratique à la protection sélective des lignes de transport d'énergie.

Nous limiterons notre étude au cas, de beaucoup le plus important au point de vue pratique, des lignes triphasées, la généralisation des résultats aux systèmes à nombre de phases supérieur à 3 étant d'ailleurs quasi évidente.

I. — ÉQUATIONS GÉNÉRALES DES COURANTS ET DES TENSIONS LE LONG D'UNE LIGNE TRIPHASÉE EN RÉGIME DÉSÉQUILIBRÉ

Considérant une ligne aérienne à trois conducteurs disposés parallèlement au sol, nous appellerons respectivement :

$V_1 V_2 V_3$ les valeurs vectorielles des tensions alternatives de pulsation ω qui peuvent être mesurées en un point de la ligne entre chaque fil et la terre,

et I_1 I_2 I_3 les valeurs des courants qui circulent en ce même point dans chacun des fils de la ligne.

D'après le théorème de Fortescue (7), on sait que n vecteurs quelconques peuvent être remplacés par l'ensemble de n systèmes de vecteurs polyphasés équilibrés. Chacun de ces systèmes comprend n vecteurs de même module, et les angles qui séparent les vecteurs successifs dans un même système sont respectivement :

0 pour le premier (système à succession de phases nulles ou système homopolaire) ;

$\frac{2\pi}{n}$ pour le second (système à succession de phases 1 ou système direct) ;

$\frac{2.2\pi}{n}$ pour le troisième ;

$(n-1)\frac{2\pi}{n}$ pour le dernier.

Trois vecteurs $A_1 A_2 A_3$ sont donc respectivement équivalents aux ensembles de :

1° Un système à succession de phases nulle ou « système homopolaire (1), composé de trois vecteurs équipollents, soit :

$A_0 = \frac{1}{3}(A_1 + A_2 + A_3)$ dans les trois phases.

(1) On a longtemps donné à ce système le qualificatif de monophasé », que nous avons nous-mêmes jusqu'à maintenant fréquemment utilisé. M Blondel a récemment proposé (8) d'appeler ce système « homopolaire »; cette appellation nous paraît effectivement plus correcte et moins sujette à confusion que la précédente, et nous l'adopterons au cours de ce mémoire.

2° Un système à succession de phases 1, ou « système direct » dont les trois vecteurs sont :

$$\begin{cases} A_d^{(1)} = \frac{1}{3}(A_1 + a^2A_2 + aA_3) & \text{dans la phase 1} \\ A_d^{(2)} = aA_d^{(1)} \quad \dots & \text{dans la phase 2} \\ A_d^{(3)} = a^2A_d^{(1)} \quad \dots & \text{dans la phase 3} \end{cases}$$

a désignant l'opérateur $e^{j\frac{2\pi}{3}}$ $(j = \sqrt{-1})$.

3° Un système à succession de phases 2 ou « système inverse », dont les trois vecteurs sont :

$$\begin{cases} A_i^{(1)} = \frac{1}{3}(A_1 + aA_2 + a^2A_3) & \text{dans la phase 1} \\ A_i^{(2)} = a^2A_i^{(1)} \quad \dots & \text{dans la phase 2} \\ A_i^{(3)} = aA_i^{(1)} \quad \dots & \text{dans la phase 3.} \end{cases}$$

Les notations adoptées correspondent aux conventions de signes suivantes : le sens de rotation des vecteurs est le sens trigonométrique, et dans le système direct, la phase 2 précède d'un tiers de période la phase 1.

Chacun de ces systèmes étant entièrement défini par l'indice exprimant la succession de phases et par l'un de ses vecteurs, les trois vecteurs $A_1A_2A_3$ sont connus dès que l'on a déterminé le vecteur dans la phase prise comme origine de chacun des systèmes composants.

Les trois tensions $V_1V_2V_3$ et les trois courants $I_1I_2I_3$ peuvent donc s'exprimer respectivement par leurs composantes symétriques $V_oV_iV_d$ et $I_oI_iI_d$:

On a, en effet, pour les tensions :

$$\begin{cases} V_1 = V_o + V_i + V_d \\ V_2 = V_o + a^2V_i + aV_d \\ V_3 = V_o + aV_i + a^2V_d \end{cases}$$

et pour les courants :

$$\begin{cases} I_1 = I_o + I_i + I_d \\ I_2 = I_o + a^2I_i + aI_d \\ I_3 = I_o + aI_i + a^2I_d. \end{cases}$$

Ces résultats sont classiques, et leur démonstration est ici inutile.

Le problème que nous nous proposons de résoudre actuellement consiste à établir la loi de répartition des courants et des tensions déséquilibrées le long de la ligne, en leur substituant en chaque point leurs composantes symétriques.

Nous admettrons tout d'abord, que chaque fil de la ligne constitue avec le sol un circuit possédant une résistance linéique ρ et une self

inductance linéique λ bien définies. Nous admettrons de plus que pour chaque élément de la ligne on peut considérer un coefficient de « mutuelle impédance » entre chacun des circuits constitués d'une part par un fil de ligne et la terre, et d'autre part par le fil voisin et la terre ; ce coefficient de mutuelle impédance μ, qui sera généralement une quantité complexe, est défini par la force électromotrice E développée dans une longueur unité de l'un des circuits lorsque l'autre circuit est parcouru par un courant I de pulsation ω,

$$\mu = \frac{E}{I}.$$

Enfin nous admettons l'existence d'une admittance linéique ν entre chaque fil et le sol, et entre les différents fils.

Nous reviendrons ultérieurement en détail sur la validité théorique et expérimentale de ces hypothèses ; leur adoption *a priori* nous permet de nous servir des relations de Kirchhoff pour la mise en équation du problème.

Nous considérerons donc chacun des circuits constitués respectivement par le conducteur 1 et la terre (circuit 1), le conducteur 2 et la terre (circuit 2) et le conducteur 3 et la terre (circuit 3).

Nous appellerons $\zeta_1\zeta_2\zeta_3$ les impédances linéiques (de la forme $\rho + j\lambda\omega$) de chacun de ces circuits,

$\mu_{12}\mu_{23}\mu_{31}$ les mutuelles impédances linéiques de chaque circuit avec un des circuits voisins,

$\xi_1\xi_2\xi_3$ les admittances linéiques entre chaque fil et le sol,

$\nu_{12}\nu_{23}\nu_{31}$ les admittances linéiques entre chaque fil et l'un des fils voisins.

1re *loi de* Kirchhoff

Les chutes de tension le long d'un élément dx de la ligne sont donc respectivement :

$$(1) \qquad \begin{cases} -dV_1 = (\zeta_1 I_1 + \mu_{12} I_2 + \mu_{13} I_3)dx \\ -dV_2 = (\zeta_2 I_2 + \mu_{21} I_1 + \mu_{23} I_2)dx \\ -dV_3 = (\zeta_3 I_3 + \mu_{31} I_1 + \mu_{32} I_2)dx. \end{cases}$$

Soit, en remplaçant $V_1V_2V_3$ d'une part, et $I_1I_2I_3$ d'autre part par leurs composantes symétriques.

$$\begin{aligned} -3\frac{dV_0}{dx} &= I_0\left[(\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3) + 2(\mu_{23} + \mu_{13} + \mu_{12})\right] \\ &+ I_i\left[(\zeta_1 + a^2\zeta_2 + a\zeta_3) - (\mu_{23} + a^2\mu_{13} + a\mu_{12})\right] \\ &+ I_d\left[(\zeta_1 + a\zeta_2 + a^2\zeta_3) - (\mu_{23} + a\mu_{13} + a^2\mu_{12})\right] \end{aligned}$$

$$-3\,\frac{dV_i}{dx} = I_0[(\zeta_1 + a\zeta_2 + a^2\zeta_3) - (\mu_{23} + a\mu_{13} + a^2\mu_{12})],$$
$$+ I_i[(\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3) - (\mu_{23} + \mu_{13} + \mu_{12})],$$
$$+ I_d[(\zeta_1 + a^2\zeta_2 + a\zeta_3) + 2(\mu_{23} + a^2\mu_{13} + a\mu_{12})];$$

$$-3\,\frac{dV_d}{dx} = I_0[(\zeta_1 + a^2\zeta_2 + a\zeta_3) - (\mu_{23} + a^2\mu_{13} + a\mu_{12})],$$
$$+ I_i[(\zeta_1 + a\zeta_2 + a^2\zeta_3) + 2(\mu_{23} + a\mu_{13} + a^2\mu_{12})],$$
$$+ I_d[(\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3) - (\mu_{23} + \mu_{13} + \mu_{12})];$$

soit en posant

$$\left|\begin{array}{ll} \zeta_0 = \frac{1}{3}(\zeta_1 + \zeta_2 + \zeta_3) & \mu_0 = \frac{1}{3}(\mu_{23} + \mu_{13} + \mu_{12}), \\ \zeta_i = \frac{1}{3}(\zeta_1 + a\zeta_2 + a^2\zeta_3) & \mu_i = \frac{1}{3}(\mu_{23} + a\mu_{13} + a^2\mu_{12}), \\ \zeta_d = \frac{1}{3}(\zeta_1 + a^2\zeta_2 + a\zeta_3) & \mu_d = \frac{1}{3}(\mu_{23} + a^2\mu_{13} + a\mu_{12}), \end{array}\right.$$

$$(2)\quad \left\{\begin{array}{l} -\frac{dV_0}{dx} = I_0(\zeta_0 + 2\mu_0) + I_i(\zeta_d - \mu_d) + I_d(\zeta_i - \mu_i), \\ -\frac{dV_i}{dx} = I_0(\zeta_i - \mu_i) + I_i(\zeta_0 - \mu_0) + I_d(\zeta_d + 2\mu_d), \\ -\frac{dV_d}{dx} = I_0(\zeta_d - \mu_d) + I_i(\zeta_i + 2\mu_i) + I_d(\zeta_0 - \mu_0). \end{array}\right.$$

2e *loi de* Kirchhoff

Les variations du courant le long d'un élément dx de la ligne sont de même :

$$(3)\quad \left\{\begin{array}{l} -dI_1 = [\xi_1 V_1 + \nu_{12}(V_1 - V_2) + \nu_{13}(V_1 - V_3)]dx, \\ -dI_2 = [\xi_2 V_2 + \nu_{12}(V_2 - V_1) + \nu_{23}(V_2 - V_3)]dx, \\ -dI_3 = [\xi_3 V_3 + \nu_{13}(V_3 - V_1) + \nu_{32}(V_3 - V_2)]dx, \end{array}\right.$$

soit, en remplaçant les courants et les tensions par leurs composantes symétriques :

$$-3\,\frac{dI_0}{dx} = V_0(\xi_1 + \xi_2 + \xi_3) + V_i(\xi_1 + a^2\xi_2 + a\xi_3) + V_d(\xi_1 + a\xi_2 + a^2\xi_3),$$

$$-3\,\frac{dI_i}{dx} = V_0(\xi_1 + a\xi_2 + a^2\xi_3) + V_i[(\xi_1 + \xi_2 + \xi_3) + 3(\nu_{23} + \nu_{13} + \nu_{12})]$$
$$+ V_d[(\xi_1 + a^2\xi_2 + a\xi_3) - 3(\nu_{23} + a^2\nu_{13} + a\nu_{12})],$$

$$-3\,\frac{dI_d}{dx} = V_0(\xi_1 + a^2\xi_2 + a\xi_3) + V_i[(\xi_1 + a\xi_2 + a^2\xi_3) - 3(\nu_{23} + a\nu_{13} + a^2\nu_{12})],$$
$$+ V_d[(\xi_1 + \xi_2 + \xi_3) + 3(\nu_{23} + \nu_{13} + \nu_{12})],$$

ou en posant

$$\left\{\begin{array}{ll}\xi_0 = \dfrac{1}{3}(\xi_1 + \xi_2 + \xi_3) & \nu_0 = \dfrac{1}{3}(\nu_{23} + \nu_{13} + \nu_{12}), \\ \xi_i = \dfrac{1}{3}(\xi_1 + a\xi_2 + a^2\xi_3) & \nu_i = \dfrac{1}{3}(\nu_{23} + a\nu_{13} + a^2\nu_{12}), \\ \xi_d = \dfrac{1}{3}(\xi_1 + a^2\xi_2 + a\xi_3) & \nu_d = \dfrac{1}{3}(\nu_{23} + a^2\nu_{13} + a\nu_{12}),\end{array}\right.$$

$$(4) \quad \left\{\begin{array}{l} -\dfrac{dI_0}{dx} = V_0\xi_0 + V_i\xi_d + V_d\xi_i, \\ -\dfrac{dI_i}{dx} = V_0\xi_i + V_i(\xi_0 + 3\nu_0) + V_d(\xi_d - 3\nu_d), \\ -\dfrac{dI_d}{dx} = V_0\xi_d + V_i(\xi_i - 3\nu_i) + V_d(\xi_0 + 3\nu_0). \end{array}\right.$$

En résolvant 2 et 4 on peut tirer deux systèmes d'équations simultanées, un pour les tensions $V_0 V_i V_d$, l'autre pour les courants $I_0 I_i I_d$.

En posant

$$(5) \quad \left\{\begin{array}{l} (\zeta_0 + 2\mu_0)\xi_0 + (\zeta_d - \mu_d)\xi_i + (\zeta_i - \mu_i)\xi_d = K^2{}_0, \\ (\zeta_0 - \mu_0)(\xi_0 + 3\nu_0) + (\zeta_d + 3\mu_d)(\xi_i - 3\nu_i) + (\zeta_i - \mu_i)\xi_d = K^2{}_i, \\ (\zeta_0 - \mu_0)(\xi_0 + 3\nu_0) + (\zeta_i + 3\mu_i)(\xi_d - 3\nu_d) + (\zeta_d - \mu_d)\xi_i = K^2{}_d. \end{array}\right.$$

$$(6) \quad \left\{\begin{array}{l} (\zeta_0 + 2\mu_0)\xi_d + (\zeta_d - \mu_d)(\xi_0 + 3\nu_0) + (\zeta_i - \mu_i)(\xi_i - 3\nu_i) = a^2, \\ (\zeta_0 + 2\mu_0)\xi_i + (\zeta_d - \mu_d)(\xi_d - 3\nu_d) + (\zeta_i - \mu_i)(\xi_0 + 3\nu_0) = b^2, \\ (\zeta_i - \mu_i)\xi_0 + (\zeta_0 - \mu_0)\xi_i + (\zeta_d + 3\mu_d)\xi_d = c^2, \\ (\zeta_i - \mu_i)\xi_i + (\zeta_0 - \mu_0)(\xi_d - 3\nu_d) + (\zeta_d + 3\mu_d)(\xi_0 + 3\nu_0) = e^2, \\ (\zeta_d - \mu_d)\xi_0 + (\zeta_i + 2\mu_i)\xi_i + (\zeta_0 - \mu_0)\xi_d = f^2, \\ (\zeta_d - \mu_d)\xi_d + (\zeta_i + 2\mu_i)(\xi_0 + 3\nu_0) + (\zeta_0 - \mu_0)(\xi_i - 3\nu_i) = g^2. \end{array}\right.$$

il vient

$$(7) \quad \left\{\begin{array}{l} \dfrac{d^2V_0}{dx^2} = K^2{}_0 V_0 + a^2 V_i + b^2 V_d, \\ \dfrac{d^2V_i}{dx^2} = c^2 V_0 + K^2{}_i V_i + e^2 V_d, \\ \dfrac{d^2V_d}{dx^2} = f^2 V_0 + g^2 V_i + K^2{}_d V_d \end{array}\right.$$

$$(8) \quad \left\{\begin{array}{l} \dfrac{d^2I_0}{dx^2} = K^2{}_0 I_0 + f^2 I_i + c^2 I_d, \\ \dfrac{d^2I_i}{dx^2} = b^2 I_0 + K^2{}_d I_i + e^2 I_d, \\ \dfrac{d^2I_d}{dx^2} = a^2 I_0 + g^2 I_i + K^2{}_d I_d. \end{array}\right.$$

Dans le cas le plus général, chaque composante symétrique des

courants et des tensions est donc la solution d'une équation différentielle à coefficients constants du sixième ordre.

Chaque composante se manifeste donc comme la superposition de six ondes se propageant généralement à des vitesses différentes.

En pratique toutefois, le problème se simplifie dans le cas des lignes aériennes de transport d'énergie. En effet :

a) La distance qui sépare les conducteurs est relativement faible par rapport à leur hauteur au-dessus du sol, de sorte que les coefficients $\zeta_1\zeta_2\zeta_3$, $\mu_{12}\mu_{23}\mu_{31}$, $\xi_1\xi_2\xi_3$ et $\nu_{12}\nu_{23}\nu_{31}$ sont peu différents les uns des autres.

b) Les lignes industrielles présentent généralement des transpositions de conducteurs qui annuleraient totalement la dissymétrie propre de la ligne si elles étaient parfaitement régulières, et si la distance qui sépare deux rotations complètes était petite vis-à-vis de la longueur d'onde.

Tenant compte d'autre part de l'identité $1 + a + a^2 = 0$, il en résulte que les composantes d'indices i et d des constantes ξ, ζ, μ et ν sont toujours petites vis-à-vis de leurs composantes d'indice 0.

En particulier, le produit de deux termes d'indices i ou d est négligeable devant un produit de deux termes d'indices 0 et on peut simplifier les égalités 5 de la manière suivante :

$$\text{(5 bis)} \quad \left\{ \begin{array}{l} K_0^2 = (\zeta_0 + 2\mu_0)\xi_0, \\ K_i^2 = K_d^2 = (\zeta_0 - \mu_0)(\xi_0 + 3\nu_0) = K^2. \end{array} \right.$$

Première approximation

En considérant les paramètres a^2, b^2, c^2, e^2, f^2, g^2, comme des quantités du second ordre négligeables devant K_0^2 et K^2 (1) l'élimination de V_i et de V_d du système conduit à l'équation différentielle

$$\text{(9)} \quad \left\{ \frac{d^4V_0}{dx^4} - (K^2_0 + K^2)\frac{d^2V_0}{dx^2} + K^2K^2_0V_0 = 0, \right.$$

dont l'équation caractéristique est bicarrée, et a pour racines

$$\pm K_0 \text{ et } \pm K.$$

La solution est donc de la forme

$$A_1e^{K_0x} + A_2e^{-K_0x} + B_1e^{Kx} + B_2e^{-Kx}.$$

La composante homopolaire des tensions le long de la ligne se présente donc comme la superposition de quatre ondes :

(1) Les valeurs numériques calculées p. 24, dans un cas particulièrement défavorable, montrent que le module du plus grand des coefficients a^2b^2 ... g^2, ne dépasse pas 10 pour cent du module de K^2 et de K_0^2.

les deux premières se propagent avec une constante de propagation K_0, l'une dans le sens des x positifs, l'autre dans le sens des x négatifs ;

les deux autres se propagent avec une constante K, l'une dans le sens des x positifs, l'autre dans le sens des x négatifs.

En éliminant de même V_0 et V_d puis V_i du système 7, on trouve avec la même approximation :

$$\frac{d^4V_i}{dx^4} - 2K^2 \frac{d^2V_i}{dx^2} + K^4V_i = V_0c^2(K^2_0 - K^2) \tag{10}$$

et

$$\frac{d^4V_d}{dx^4} - 2K^2 \frac{d^2V_d}{dx^2} + K^4V_d = V_0f^2(K_0^2 - K^2). \tag{11}$$

Les premiers membres de ces deux équations admettent quatre solutions qui sont de la forme e^{Kx}, e^{-Kx}, xe^{Kx} et $-xe^{-Kx}$ représentant chacune une onde ayant la constante de propagation K.

La solution complète de chacune des équations 10 et 11 conduit donc à considérer les composantes V_i et V_d comme étant, elles aussi, constituées par deux paires d'ondes, ayant pour constante de propagation K et K_0.

Toutefois, la présence des termes de la forme $\pm xe^{\pm Kx}$, qui partent de zéro pour $x = 0$, montre que les ondes qui se propagent avec la constante K peuvent présenter un maximum ailleurs qu'à l'extrémité, et faire apparaître certaines résonances « anormales » des composantes V_i et V_d, comme le montrera l'étude expérimentale exposée au chapitre III.

On aboutirait à des conclusions identiques en ce qui concerne les composantes I_0 I_i et I_d des courants, calculées à partir du système 8.

Seconde approximation

Comme seconde approximation, on peut supposer les impédances et admittances de la ligne parfaitement équilibrées, ce qui revient à considérer comme nuls les paramètres a^2, b^2, c^2, e^2, f^2, g^2. C'est cette approximation qui est couramment admise dans les calculs de transport d'énergie à longue distance, en basse fréquence. Elle conduit aux deux systèmes simples :

$$(12)\quad \begin{cases} \dfrac{d^2V_0}{dx^2} = K^2_0 V_0 \\ \dfrac{d^2V_i}{dx^2} = K^2 V_i \\ \dfrac{d^2V_d}{dx^2} = K^2 V_d \end{cases} \qquad (13)\quad \begin{cases} \dfrac{d^2I_0}{dx^2} = K^2_0 I_0 \\ \dfrac{d^2I_i}{dx^2} = K^2 I_i \\ \dfrac{d^2I_d}{dx^2} = K^2 I_d \end{cases}$$

Les systèmes homopolaire, direct et inverse, sont alors indépendants les uns des autres.

La composante homopolaire du courant et de la tension est alors constituée par deux ondes (une onde directe et une onde réfléchie) se propageant avec la constante K_0 ; de même les composantes directe et inverse sont constituées chacune par une onde incidente et une onde réfléchie se propageant avec la constante K :

$$(14)\quad \begin{cases} V_0 = A_0 e^{K_0 x} + A'_0 e^{-K_0 x} \\ V_i = A_i e^{Kx} + A'_i e^{-Kx} \\ V_d = A_d e^{Kx} + A'_d e^{-Kx}, \end{cases} \qquad (15)\quad \begin{cases} I_0 = B_0 e^{K_0 x} + B'_0 e^{-K_0 x} \\ I_i = B_i e^{Kx} + B'_i e^{-Kx} \\ I_d = B_d e^{Kx} + B'_d e^{-Kx}. \end{cases}$$

Nous appellerons dorénavant

$$K_0 = \sqrt{(\zeta_0 + 2\mu_0)\xi_0},$$

constante de propagation « homopolaire » de la ligne et

$$K = \sqrt{(\zeta_0 - \mu_0)(\xi_0 + 3\nu_0)}$$

constante de propagation « triphasée » de cette même ligne.

Tenant compte d'autre part des équations 2 et 4 dans lesquelles on suppose nuls les coefficients d'indices i et d, il vient

$$\frac{A_0}{B_0} = -\frac{A'_0}{B'_0} = -\frac{\zeta_0 + 2\mu_0}{K_0} = -\sqrt{\frac{\zeta_0 + 2\mu_0}{\xi_0}}$$

$$\frac{A_i}{B_i} = \frac{A_d}{B_d} = -\frac{A'_i}{B'_i} = -\frac{A'_d}{B'_d} = -\sqrt{\frac{\zeta_0 - \mu_0}{\xi_0 + 3\nu_0}}.$$

Nous appellerons dans tout ce qui suit

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\zeta_0 + 2\mu_0}{\xi_0}}$$

impédance caractéristique « homopolaire » de la ligne, et

$$Z = \sqrt{\frac{\zeta_0 - \mu_0}{\xi_0 + 3\nu_0}}$$

impédance caractéristique « triphasée » de la ligne.

Les égalités 15 peuvent alors s'écrire

$$(16)\quad \left\{ \begin{aligned} I_0 &= \frac{1}{Z_0}\left(A'_0 e^{-K_0 x} - A_0 e^{K_0 x}\right), \\ I_i &= \frac{1}{Z}\left(A'_i e^{-Kx} - A_i e^{Kx}\right), \\ I_d &= \frac{1}{Z}\left(A'_d e^{-Kx} - A_d e^{Kx}\right), \end{aligned} \right.$$

soit en prenant comme référence les composantes symétriques à l'extrémité réceptrice $(x = 0)$ suivant la méthode classique :

$$V_{r_0},\ V_{ri},\ V_{rd}, \qquad I_{r_0},\ I_{ri},\ I_{rd},$$

$$(17)\quad \left\{ \begin{aligned} V_0 &= V_{r_0} \operatorname{Cosh} K_0 x + Z_0 I_{r_0} \operatorname{Sinh} K_0 x, \\ V_i &= V_{ri} \operatorname{Cosh} Kx + Z I_{ri} \operatorname{Sinh} Kx, \\ V_d &= V_{rd} \operatorname{Cosh} Kx + Z I_{rd} \operatorname{Sinh} Kx \end{aligned} \right.$$

et

$$(18)\quad \left\{ \begin{aligned} I_0 &= I_{r_0} \operatorname{Cosh} K_0 x + \frac{V_{r_0}}{Z_0} \operatorname{Sinh} K_0 x, \\ I_i &= I_{ri} \operatorname{Cosh} Kx + \frac{V_{ri}}{Z} \operatorname{Sinh} Kx, \\ I_d &= I_{rd} \operatorname{Cosh} Kx + \frac{V_{rd}}{Z} \operatorname{Sinh} Kx. \end{aligned} \right.$$

Telles sont les relations que nous utiliserons longuement au chapitre IV ; ces dernières équations ont été établies pour la première fois par S. Bekku (9) en supposant la terre parfaitement conductrice et en négligeant *a priori* la dissymétrie propre de la ligne.

II. — JUSTIFICATION THEORIQUE DE L'EMPLOI DES EQUATIONS DE KIRCHHOFF

Avant de pousser plus avant l'emploi des équations que nous avons établies au chapitre précédent, le moment nous paraît être venu de justifier l'emploi des constantes linéiques qui nous ont servi à les établir.

Nous avons supposé en particulier que chaque conducteur constitue avec le sol un circuit d'impédance linéique $\xi = \rho + j\lambda\omega$, et que deux circuits constitués par deux fils parallèles et utilisant la terre comme conducteur de retour commun à ces deux circuits possèdent une mutuelle impédance linéique μ.

Or l'équation de Kirchhoff n'est applicable que dans l'état semi-permanent, c'est-à-dire si les courants varient assez peu d'un point à l'autre de la ligne.

On peut donc poser *à priori* que, quelles que soient les hypothèses admises, ces équations ne sont valables, en toute rigueur, dans le cas de deux conducteurs parallèles qui nous occupe (fils de ligne et terre), que si la longueur d'onde est grande vis-à-vis des distances considérées [1].

Une première hypothèse fréquemment formulée consiste à supposer que la terre est parfaitement conductrice.

Dans ce cas, les constantes linéiques ont des valeurs bien connues, soit :

(19) $\zeta_1 = (r + jl\omega) + 2j\omega \operatorname{Log} \dfrac{2h_1}{a}$ pour l'impédance linéique,

(20) $\mu_{12} = 2j\omega \operatorname{Log} \dfrac{h_{12}}{\delta_{12}}$ pour la mutuelle impédance linéique entre deux conducteurs

$r + jl\omega$ étant l'impédance propre d'un conducteur, h_1 sa hauteur au-

[1] En réalité en régime sinusoïdal établi, les problèmes de propagation peuvent toujours être ramenés à des équations linéaires, quitte à donner aux quatre coefficients (inductance, résistance, conductance et capacité) des valeurs particulières pour chacune des fréquences envisagées. C'est ainsi que les équations de Kirchhoff « rendent compte » des phénomènes de propagation dans les enroulements des transformateurs et permettent sinon d'effectuer des calculs numériques, du moins d'interpréter fort commodément les phénomènes dont ces appareils peuvent être le siège (10).

dessous du sol, ϱ son rayon, h_{12} la distance entre le conducteur 1 et l'image du conducteur 2, et δ_{12} la distance séparant les deux conducteurs.

Mais, cette hypothèse du sol parfaitement conducteur conduirait d'une part à donner aux différents coefficients d'induction des valeurs indépendantes de la fréquence, et d'autre part à supposer que la résistance de chaque circuit n'excède pas celle du conducteur à la fréquence considérée (c'est-à-dire compte tenu de l'effet Kelvin dans le conducteur lui-même) ; elle conduit à des résultats fort éloignés de la réalité.

La considération d'un conducteur fictif de retour, situé au-dessous de la surface de la terre à une profondeur variable suivant la conductibilité du sol et la fréquence, constitue un mode d'interprétation commode des résultats expérimentaux (11) mais ne fournit qu'une base théorique arbitraire pour la discussion, et ne permet pas de prédéterminer les valeurs des résistances et des coefficients d'induction dont nous devons justifier l'existence.

Une base beaucoup plus solide peut être trouvée dans les théories qui ont été récemment développées par les télégraphistes en vue de prédéterminer les tensions induites le long des lignes de télécommunication par les lignes de transport d'énergie, et plus particulièrement dans le mémoire de J.-R. Carson.

Rappel de la théorie de Carson (12)

J.-R. Carson a cherché à déterminer la valeur de la constante K qui doit régler la propagation des ondes de courant et de tension le long d'un fil parallèle à la terre, dans le cas d'un régime périodique établi de pulsation ω, le courant, la charge et le champ étant supposés contenir un facteur commun $e^{(-Kx + j\omega t)}$.

Les principales hypothèses admises dans cette théorie sont les suivantes :

1° la longueur d'onde L est grande vis-à-vis de la hauteur h des conducteurs au-dessus du sol, et la constante de propagation $\frac{2\pi}{L}$ suffisamment petite pour que l'on puisse négliger dans les calculs tous les termes contenant un facteur K^2 : le champ électrostatique entre le fil et le sol est alors sensiblement le même que si le courant avait, à chaque instant, en tous points, la même intensité, et les composantes des courants de déplacement parallèles à la direction de la propaga-

tion, apparaissent affectées d'un coefficient K^2 et sont donc négligeables.

2° Dans les parties conductrices, l'intensité du champ électrique est partout parallèle à l'axe de propagation, et les composantes de ce champ normales à cet axe de propagation sont nulles, car les courants sont dirigés dans le sens de l'axe : le potentiel vecteur se réduit donc à sa composante parallèle au fil.

3° Dans le sol, le courant de déplacement est négligeable devant le courant de conduction.

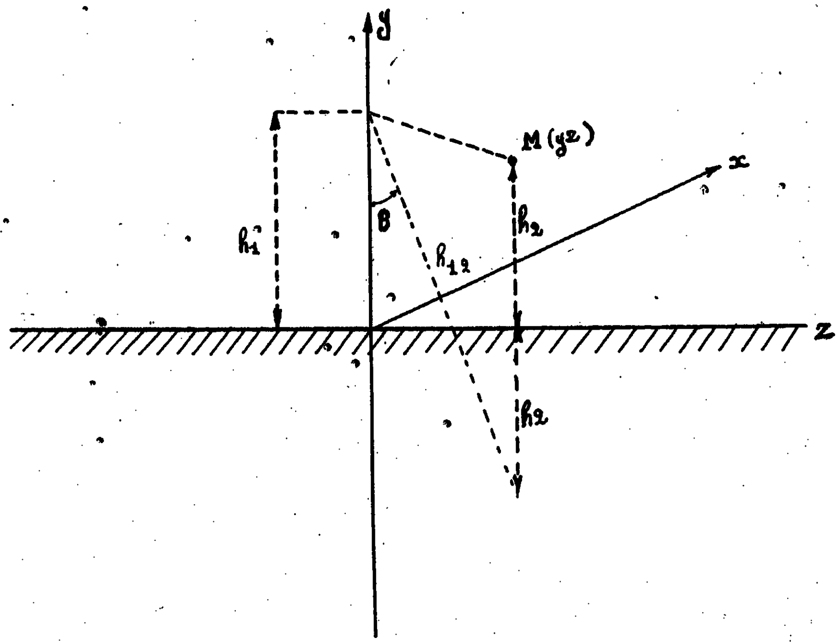


Fig. 1. — Coordonnées, dans un plan perpendiculaire à une ligne aérienne, de la trace M de cette ligne.

4° Dans tout le champ, le sol peut être considéré comme un conducteur homogène, de conductibilité σ constante.

Partant des équations générales du champ électromagnétique dans les milieux de perméabilité égale à l'unité, soit :

$$\left\{\begin{array}{l} \text{rot. } H = 4\pi i \\ \text{rot. } E = -\dfrac{\partial H}{\partial t}, \end{array}\right.$$

et admettant les hypothèses précédentes, Carson calcule la composante axiale du champ électrique $E_{(yz)}$ en un point M de l'espace de coordonnées y, z (fig. 1) et montre qu'elle a pour expression :

$$(21) \quad E_{(y,z)} = KV - 2j\omega I \operatorname{Log} \sqrt{\frac{(h_1+y)^2+z^2}{(h_1-y)^2+z^2}} - 4\omega I \int_0^\infty (\sqrt{\eta^2+j} - \eta) e^{-(h_1+y)\eta m} \cos z\eta m \, d\eta,$$

dans laquelle :

h_1 est la hauteur du conducteur au-dessus du sol.

V le potentiel scalaire entre le point M et le sol.

I le courant qui circule dans le conducteur

ω sa pulsation

σ la conductibilité du sol

η une variable d'intégration.

$$m = \sqrt{4\pi\sigma\omega},$$

1° A la surface du conducteur $y = h_1$, $z = a$, a étant le rayon du conducteur.

a^2 est négligeable devant h_1^2, et la composante axiale du champ est égale à $(r + jl\omega)I$.

r étant la résistance propre du conducteur et l son inductance propre (voisine de $\frac{1}{2}$ pour des courants de basse fréquence et tendant vers zéro lorsque l'effet Kelvin devient important),

d'où :

$$E_{(h,a)} = (r + jl\omega)I = KV - 2j\omega I \operatorname{Log} \frac{2h_1}{a} - 4\omega I \int_0^\infty (\sqrt{\eta^2+j} - \eta) e^{-2h_1 m\eta} d\eta.$$

En appelant q la charge du conducteur, c sa capacité par rapport au sol, et g sa conductance, on a :

$$-\frac{\partial I}{\partial z} = KI = gV + \frac{dq}{dt} = gV + jc\omega V,$$

et en reportant la valeur du potentiel V tiré de cette dernière équation dans l'expression de $E_{(h,a)}$ on trouve :

$$(22) \quad K^2 = (g + jc\omega)\left[r + jl\omega + 2j\omega \operatorname{Log} \frac{2h_1}{a} + 4\omega \int_0^\infty (\sqrt{\eta^2+j} - \eta) e^{-2h_1 m\eta} d\eta\right],$$

et l'impédance caractéristique $\frac{V}{I}$ sera :

$$(23) \quad \frac{V}{I} = \sqrt{\frac{r + jl\omega + 2j\omega \operatorname{Log} \frac{2h_1}{a} + 4\omega \int_0^\infty (\sqrt{\eta^2+j} - \eta) e^{-2h_1 m\eta} d\eta}{g + jc\omega}}.$$

Le circuit constitué par le conducteur et la terre a donc une impédance linéique propre égale à :

$$(24) \quad \zeta = \left[r + jl\omega + 2j\omega \operatorname{Log} \frac{2h_1}{a}\right] + [P + jQ]4\omega,$$

la première parenthèse du second nombre est égale à l'impédance

qu'aurait le circuit si le sol était parfaitement conducteur (égalité 19), elle est indépendante de la fréquence ; la seconde parenthèse est le résultat de l'intégration de

$$\int_0^\infty (\sqrt{\eta^2+j}-\eta)e^{-2h_1 m\eta}d\eta.$$

2° Dans un second conducteur parallèle de longueur égale à l'unité et dont la trace dans le plan normal au fil a pour coordonnées yz, la force électromotrice induite par le courant I et circulant dans le conducteur 1 et la terre est $E_{(yz)}$,

$$E_{(yz)} = -M\frac{dI}{dt} = -jM\omega I.$$

En appelant :

h_2 la hauteur du second conducteur au-dessus du sol, h_{12} la distance entre le conducteur 1 et l'image du conducteur 2,

δ_{12} la distance qui sépare les deux conducteurs,

$$y = h_2 \qquad \text{et} \qquad z = \sqrt{\delta_{12}^2 - (h_1 - h_2)^2},$$

et la mutuelle impédance $\mu_{12} = - jM\omega$ entre les deux circuits avec retour par le sol est $-\dfrac{E_{(yz)}}{I}$,

soit

$$\mu_{12} = \left(2j\omega \operatorname{Log}\frac{h_{12}}{\delta_{12}}\right) + 4\omega(P' + jQ'), \tag{25}$$

la première parenthèse est égale à la mutuelle impédance qu'auraient les deux circuits si le sol était parfaitement homogène (équation 20), et la seconde parenthèse est le résultat de l'intégration de

$$\int_0^\infty (\sqrt{\eta^2+j}-\eta)e^{-(h_1+h_2)\eta m}\cos \eta m\sqrt{\delta_{12}^2-(h_1-h_2)^2}\,d\eta.$$

Le mémoire de Carson contient des développements en série et des abaques qui permettent de calculer les valeurs numériques de P, Q, P′ et Q′ connaissant d'une part les hauteurs des conducteurs au-dessus du sol et leur écartement, et d'autre part la fréquence, et la conductibilité de la terre. Nous rappelons ci-dessous quelques-uns de ces développements.

En posant :

$$p = mh_{12},$$

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{\sqrt{\delta_{12}^2 - (h_1 - h_2)^2}}{h_1 + h_2},$$

1° Pour $p \leqslant 0,25$

$$\left\{\begin{array}{l}\left.\begin{array}{l}P\\P'\end{array}\right\} = \dfrac{\pi}{8} - \dfrac{p}{3\sqrt{2}}\cos\theta + \dfrac{p^2}{16}\cos 2\theta\left(0,673 + \log\dfrac{2}{p}\right) + \dfrac{p^2}{16}\,\theta\sin\theta,\\[2ex] \left.\begin{array}{l}Q\\Q'\end{array}\right\} = 0,0386 + \dfrac{1}{2}\log\dfrac{2}{p} + \dfrac{p}{3\sqrt{2}}\cos\theta,\end{array}\right.$$

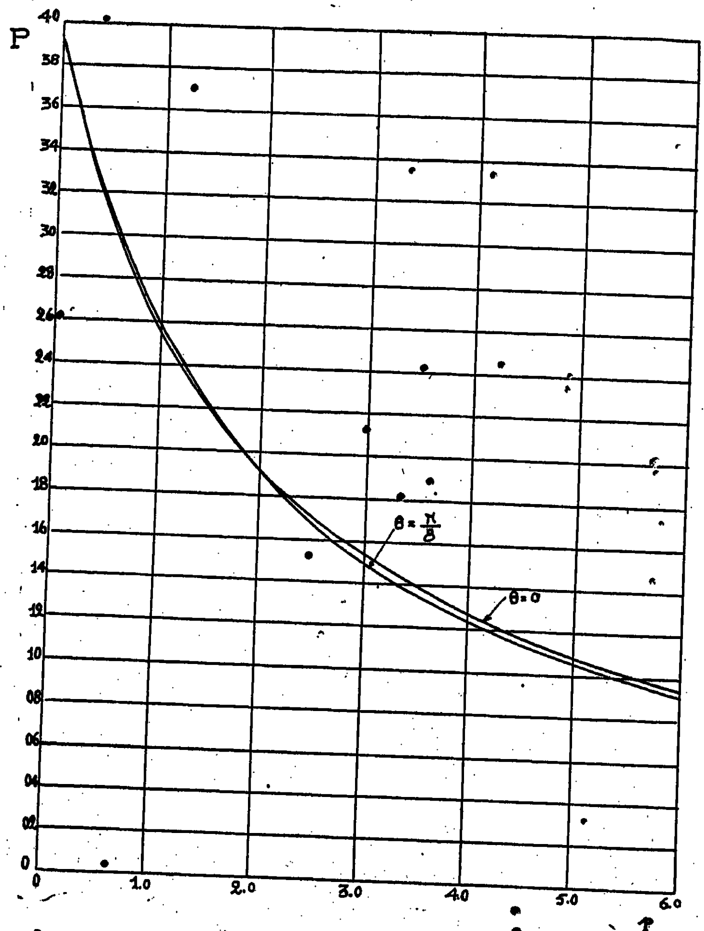


Fig. 2. — Courbes des valeurs du terme réel P de la formule de Carson, en fonction des paramètres p et θ.

2° Pour $p > 5$

$$\left\{\begin{array}{l}\left.\begin{array}{l}P\\P'\end{array}\right\} = \dfrac{\cos\theta}{p\sqrt{2}} - \dfrac{\cos 2\theta}{p^2} + \dfrac{\cos 3\theta}{p^3\sqrt{2}} + \dfrac{3\cos 5\theta}{p^5\sqrt{2}},\\[2ex] \left.\begin{array}{l}Q\\Q'\end{array}\right\} = \dfrac{\cos\theta}{p\sqrt{2}} - \dfrac{\cos 3\theta}{p^3\sqrt{2}} + \dfrac{3\cos 5\theta}{p^5\sqrt{2}},\end{array}\right.$$

3° Pour $p > 10$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left.\begin{array}{l} P \\ P' \end{array}\right\} = \dfrac{\cos\theta}{p\sqrt{2}} - \dfrac{\cos 2\theta}{p^2}. \\ \left.\begin{array}{l} Q \\ Q' \end{array}\right\} = \dfrac{\cos\theta}{p\sqrt{2}}. \end{array} \right.$$

Les abaques reproduits sur les figures 2 et 3 donnent les valeurs de P, P′ et de Q, Q′ pour des valeurs intermédiaires de p.

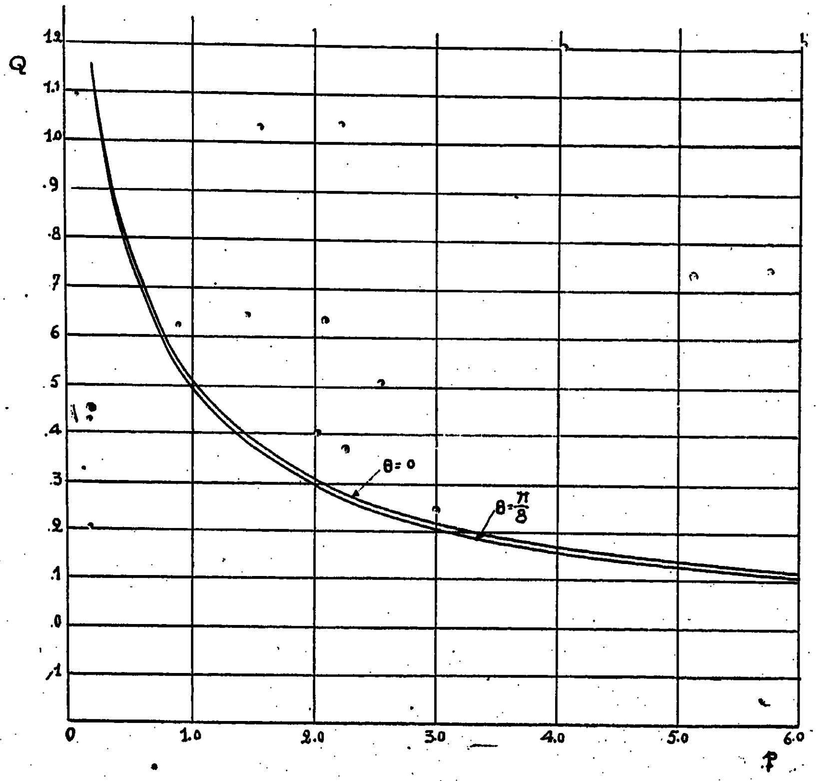


Fig. 3. — Courbes des valeurs du terme imaginaire Q de la formule de Carson, en fonction des paramètres p et θ.

Pour le calcul de P et de Q (impédance propre) il suffit de faire

$$h_2 = h_1 \quad \text{et} \quad h_{12} = 2h_1,$$

d'où

$$p = 2mh_1, \qquad \theta = 0 \qquad \cos\theta = 1.$$

Dans les cas usuels du calcul de la mutuelle impédance entre deux fils de ligne, on a toujours

$$\theta < \frac{\pi}{8}.$$

L'examen de ces formules et de ces abaques attire immédiatement certaines remarques concernant la dissymétrie propre d'une ligne à plusieurs conducteurs parallèles :

1° Pour les fréquences peu élevées, les termes additionnels PQ et P'Q' (équations 24 et 25) sont grands vis-à-vis des termes indépendants de la fréquence et de la conductibilité du sol, et varient peu en fonction de la hauteur des conducteurs et de leurs écartements respectifs. Les impédances propres ζ et les mutuelles impédances μ ont donc des valeurs très voisines pour les différents conducteurs, et la dissymétrie propre de la ligne est peu accusée.

2° Pour les hautes fréquences au contraire, les termes PQP'Q' varient rapidement avec la hauteur des conducteurs et leurs écartements, et d'ailleurs les termes indépendants de la fréquence et fonctions de dimensions géométriques de la ligne deviennent prépondérants. Les valeurs de ζ et de μ relatives aux différents conducteurs, présentent donc des écarts beaucoup plus importants que pour les basses fréquences.

Il s'ensuit évidemment que la dissymétrie propre de la ligne sera d'autant plus accusée que la fréquence des courants transportés sera plus élevée : on arrive d'ailleurs immédiatement à cette conclusion par la conception d'un fil de retour fictif commun aux fils de ligne, et situé au-dessous du sol à une distance d'autant plus grande que la fréquence est plus basse.

La théorie de Carson, ainsi que celle publiée vers la même époque par Pollaczek (13) ont été utilisées par les télégraphistes pour le calcul des tensions induites par les lignes de transport d'énergie sur les lignes de télécommunication, et plusieurs fois confrontées avec des résultats expérimentaux pour des fréquences comprises entre 16 2/3 et 2 000 p:s.

Les déterminations expérimentales des coefficients de mutuelle inductance ont prouvé que les formules de Carson fournissent bien des résultats conformes à la réalité pour une *fréquence déterminée*, mais que l'écart entre le calcul et l'expérience peut devenir important lorsque, conservant une valeur constante pour la conductibilité du sol, on fait varier la fréquence du courant inducteur (14).

Il est de fait que l'hypothèse d'une conductibilité homogène du sol, nécessaire à l'établissement des formules, est celle qui paraît la plus sujette à caution ; les courants de retour par la terre se localisant de plus en plus vers la surface du sol au fur et à mesure que la fréquence augmente, ont de larges chances de rencontrer des couches

de terrain de moins en moins conductrices. On a donc proposé d'utiliser les formules de Carson-Pollaczek en attribuant arbitrairement à la conductibilité σ une valeur inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence.

En ce qui concerne l'étude que nous avons en vue, dans laquelle nous cherchons à déterminer l'impédance d'un fil avec retour par le sol, et des mutuelles impédances avec les autres fils de la même ligne, des variations importantes de la conductibilité du sol ne conduisent heureusement qu'à de très faibles variations des impédances que l'on veut calculer. Carson montre, par exemple, qu'à la fréquence de 50 000 p:s. les termes additionnels P et Q de la formule donnant l'impédance ne varient respectivement que dans les rapports $\frac{1}{2,5}$ et $\frac{1}{5}$ lorsque la conductibilité du sol varie de $\sigma = 10^{-12}$ à $\sigma = 10^{-14}$ unités, c'est-à-dire dans le rapport de $\frac{1}{100}$. Comme par ailleurs ces termes additionnels P et Q deviennent, aux fréquences élevées, peu importants vis-à-vis de la première parenthèse de la formule, une très grande incertitude sur la valeur de σ ne conduit qu'à une erreur relativement faible sur la détermination de ζ.

Impédances apparentes pour les systèmes triphasés et homopolaires.

Les équations 24 et 25 peuvent maintenant servir à calculer les valeurs de $(\zeta_0 + 2\mu_0)$ et de $(\zeta_0 - \mu_0)$ qui représentent respectivement les impédances apparentes pour les systèmes homopolaires et triphasés, et qui entrent dans les expressions des constantes de propagation et des impédances caractéristiques.

Les trois conducteurs ont évidemment même impédance interne $r + jl\omega$ de sorte que l'on a

$$\zeta_0 = (r + jl\omega) + 2j\omega \operatorname{Log} \frac{2\sqrt[3]{h_1 h_2 h_3}}{a} + 4\omega \left[\frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} + j\,\frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3}\right]$$

et

$$\mu_0 = 2j\omega \operatorname{Log} \sqrt[3]{\frac{h_{12} h_{23} h_{13}}{\delta_{12}\delta_{23}\delta_{13}}} + 4\omega \left[\frac{P'_1 + P'_2 + P'_3}{3} + j\,\frac{Q'_1 + Q'_2 + Q'_3}{3}\right].$$

Nous verrons au cours de l'exposé des études expérimentales que, du fait de la non homogénéité du sol et de l'ignorance de la conductibilité de la terre, ces différentes équations ne peuvent fournir que des ordres de grandeur.

En se contentant d'une approximation grossière, on peut remarquer que

$$h_{12} \simeq 2h_1, \qquad h_{23} \simeq 2h_2, \qquad h_{31} \simeq 2h_3,$$

et que par conséquent $P'_1P'_2P'_3$ sont respectivement voisins de $P_1P_2P_3$, comme $Q'_1Q'_2Q'_3$ diffèrent peu, respectivement, de $Q_1Q_2Q_3$; on pourra donc écrire

$$(\zeta_0 + 2\mu_0) = (r + 12\omega P) + j\omega\left(6 \text{ Log } \frac{2h}{\sqrt[3]{a\delta^2}} + 12Q\right),$$

$$(\zeta_0 - \mu_0) = [r + 4\omega(P - P')] + j\omega\left[2 \text{ Log } \frac{2\delta}{a} + 4(Q - Q')\right].$$

P et Q étant respectivement les moyennes de P_1P_2 et P_3,
δ étant la moyenne de $\delta_{12}, \delta_{13}, \delta_{23}$,
et h étant la moyenne de h_1, h_2 et h_3.

Applications numériques à quelques cas pratiques.

Ceci posé, nous utiliserons tout d'abord ces formules pour calculer, dans quelques cas pratiques, les différents coefficients qui interviennent dans les équations générales de propagation, dans le but de vérifier si les approximations que nous avons admises en ce qui concerne la symétrie des lignes peuvent être conservées; nous nous en servirons par la suite pour prédéterminer, dans diverses hypothèses de conductibilité du sol, les constantes de propagation et impédances caractéristiques d'une ligne, en vue de confronter les résultats de la théorie avec l'expérience.

Nous considérerons successivement deux lignes à grands écartements entre conducteurs (lignes à 220 kV) : dans l'une, la trace des conducteurs sur un plan normal à la ligne constituera les sommets d'un triangle sensiblement équilatéral ; dans l'autre, les conducteurs seront disposés en nappe horizontale.

A) la première ligne a des conducteurs de 24,5 mm de diamètre disposés comme l'indique la figure 4. Elle est munie d'un fil de terre *en acier* qui ne joue qu'un rôle nul ou négligeable sur les coefficients d'induction en haute fréquence vues sa faible conductibilité et sa grande perméabilité, mais dont la présence modifie sensiblement les valeurs des capacités ; aux coefficients ξ_1, ξ_2, ξ_3, doivent être ajoutés respectivement des coefficients ν_{1T}, ν_{2T}, ν_{3T}, pour tenir compte de la capacité entre chaque fil et le câble de terre.

Pour la fréquence de 50 000 p:s, et en supposant la conductibilité du

sol égale à 10^{-13} unités cgs, on trouve les valeurs suivantes pour les constantes linéiques (en unités pratiques et par km de ligne)

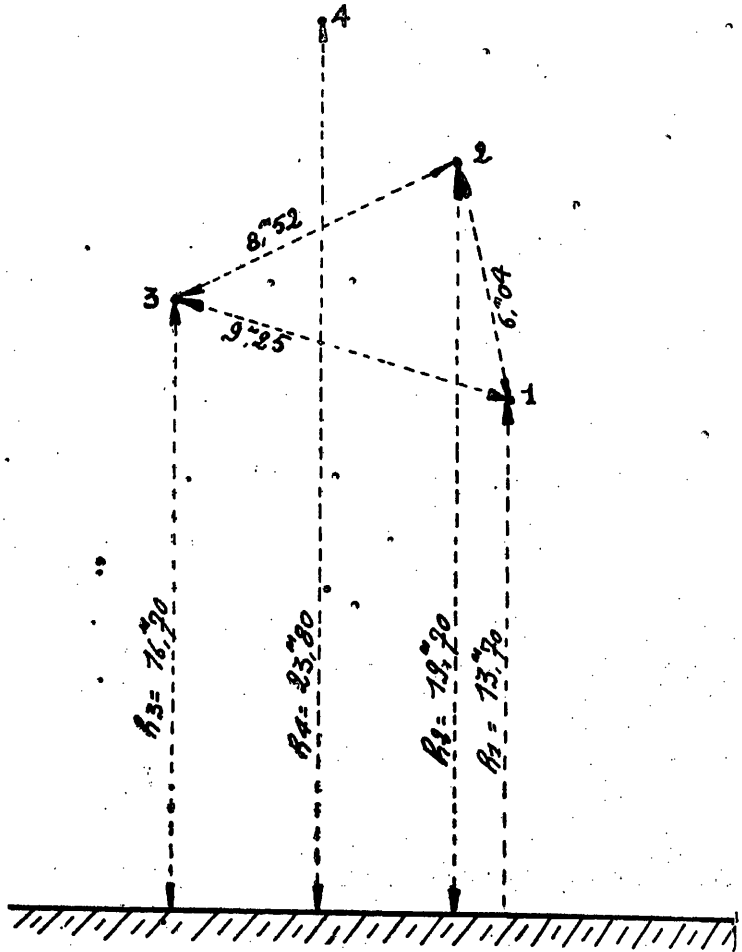


Fig. 4. — Position dans l'espace des conducteurs de la ligne aérienne considérée dans la première application numérique.

$$\begin{cases} \zeta_0 = 26{,}2 + j544 \\ \zeta_i = -0{,}23 - j3{,}4 \\ \zeta_d = 2{,}4 - j2{,}3 \end{cases} \qquad \begin{cases} \mu_0 = 23{,}3 + j129 \\ \mu_i = -9{,}1 - j1{,}83 \\ \mu_d = -7{,}8 - j1{,}3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \xi_0 = j1{,}755 10^{-3} \\ \xi_i = -(0{,}004 + j0{,}033)10^{-3} \\ \xi_d = -(0{,}004 - j0{,}032)10^{-3} \end{cases} \qquad \begin{cases} \nu_0 = j0{,}325 10^{-3} \\ \nu_i = -(0{,}015 + j0{,}045)10^{-3} \\ \nu_d = -(0{,}015 - j0{,}045)10^{-3} \end{cases}$$

D'où les valeurs suivantes pour les carrés des constantes de propagation :

$$\left\{\begin{aligned} K_0^2 &= (-1408 + j128)10^{-3} \\ K_i^2 &= (-1130 + j6{,}7)10^{-3} \\ K_d^2 &= (-1130 + j6{,}1)10^{-3} \end{aligned}\right.$$

$$\left\{\begin{aligned} a^2 &= (1{,}61 + j5{,}2)10^{-3} \\ b^2 &= (12{,}6 + j47{,}5)10^{-3} \\ c^2 &= (6{,}27 + j25{,}7)10^{-3} \\ e^2 &= (4{,}56 - j24{,}6)10^{-3} \\ f^2 &= (1{,}96 + j6{,}35)10^{-3} \\ g^2 &= -(1{,}25 + j86{,}6)10^{-3} \end{aligned}\right.$$

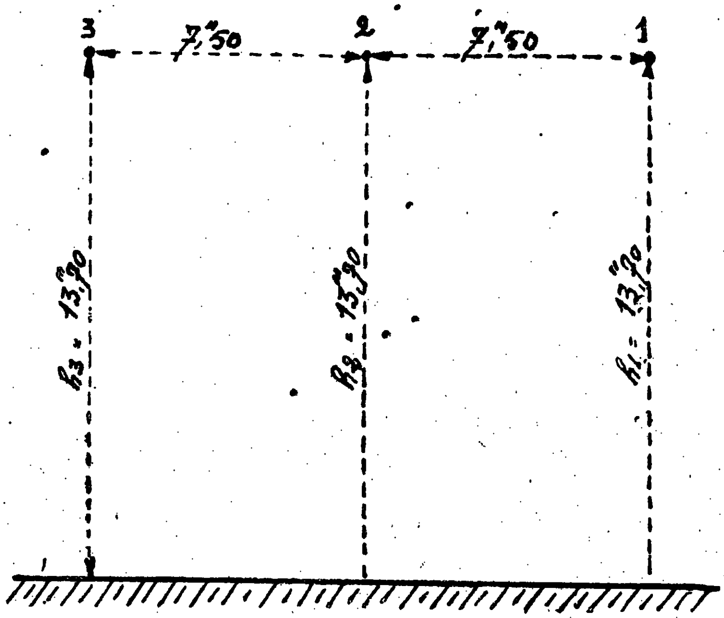


Fig. 5. — Position dans l'espace des conducteurs de la ligne aérienne considérée dans la seconde application numérique.

Le plus grand des coefficients de la seconde série — soit g^2 — a un module dont la valeur ne dépasse pas 7,5 pour cent de celle des coefficients K.

B) La seconde ligne a les mêmes conducteurs que la première (2,45 cm de diamètre) disposés comme l'indique la figure 5 : les trois conducteurs sont équidistants (7,50 m) et disposés en nappe horizontale ; on a supposé que la ligne n'est munie d'aucun fil de terre. Dans les mêmes hypothèses que ci-dessus (fréquence 50 000 p:s, conductibilité du sol 10^{-13} unité cgs) on trouve tous calculs faits :

$$\begin{cases} \zeta_0 = 28{,}5 + j587{,}5 \\ \zeta_i = 0 \\ \zeta_d = 0 \end{cases} \qquad \begin{cases} \mu_0 = 25{,}3 + j110{,}8 \\ \mu_i = 12{,}68 + j6{,}67 \\ \mu_d = -12{,}12 + j7{,}65 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \xi_0 = j1{,}46.10^{-3} \\ \xi_i = -(0{,}078 + j0{,}045)10^{-3} \\ \xi_d = -(0{,}078 + j0{,}045)10^{-3} \end{cases} \qquad \begin{cases} \nu_0 = j0{,}305.10^{-3} \\ \nu_i = -(0{,}063 + j0{,}036)10^{-3} \\ \nu_d = (0{,}063 - j0{,}036)10^{-3} \end{cases}$$

d'où

$$\begin{cases} K_0^2 = (-1112 + j116)10^{-3} \\ K_i^2 = (-1022 + j7{,}9)10^{-3} \\ K_d^2 = (-1022 + j7{,}9)10^{-3} \end{cases}$$

$$\begin{cases} a^2 = (57{,}9 + j83{,}3)10^{-3} \\ b^2 = (43{,}3 - j91{,}8)10^{-3} \\ c^2 = (27 - j48{,}8)10^{-3} \\ e^2 = (-82 - j133)10^{-3} \\ f^2 = (29{,}4 + j48{,}9)10^{-3} \\ g^2 = (-58{,}4 + j107)10^{-3} \end{cases}$$

La dissymétrie de cette ligne est donc plus accusée que celle de la précédente, mais elle pourrait être fortement corrigée par l'installation de deux câbles de terre judicieusement disposés qui compenseraient, dans une certaine mesure, la dissymétrie des capacités.

III. — MESURE DES IMPEDANCES CARACTERISTIQUES ET DES CONSTANTES DE PROPAGATION SUR UNE LIGNE TRIPHASEE A 220 kV

Bien que les différents paramètres de propagation soient en principe susceptibles d'être prédéterminés par le calcul en utilisant les formules du chapitre précédent, il paraît indispensable d'en vérifier les résultats par l'expérience dans chaque cas de la pratique. En admettant d'ailleurs que l'approximation de ces formules soit suffisante, la connaissance de certaines constantes telles que la conductibilité du sol ne peut être obtenue que par des mesures directes.

Nous examinerons donc tout d'abord quelques méthodes expérimentales qui permettent d'analyser les constantes de propagation d'une ligne alimentée en haute fréquence, puis nous indiquerons les résultats d'une série de mesures exécutées sur une longue ligne de transport d'énergie à 220 kV.

A) Méthodes d'analyse expérimentale des paramètres de propagation.

Il nous a paru souhaitable de simplifier au maximum les mesures de propagation en haute fréquence, en choisissant des méthodes qui ne nécessitent que des déterminations d'impédances apparentes.

On sait, en effet, que l'étalonnage des appareils permettant de mesurer directement des tensions des courants et des différences de phases devient particulièrement délicat dès qu'il s'agit de fréquences élevées, et que cet étalonnage doit être généralement répété pour chacune des fréquences utilisées.

La plupart des méthodes mentionnées ci-dessous consistent donc à comparer l'impédance apparente de la ligne, dans des conditions particulières de fonctionnement, à des résistances étalonnées construites spécialement pour ne posséder ni self inductance, ni capacité appréciable dans toute la gamme de fréquence explorée. Cette comparaison peut être commodément effectuée par l'une des deux méthodes suivantes :

a) Dans la première méthode (fig. 6), la source de haute fréquence

alimente simultanément la ligne et une résistance étalonnée R ; on dispose deux appareils thermiques g_1, g_2 (thermocouples et galvanomètres) mesurant respectivement le courant qui circule dans la ligne et celui qui parcourt la résistance R ; un inverseur I permet de brancher soit l'appareil g_1 en série avec la ligne et l'appareil g_2 en série avec la résistance, soit au contraire l'appareil g_2 avec la ligne, et l'appareil g_1 avec la résistance. Les appareils g_1 et g_2 ont très sensiblement même résistance et mêmes caractéristiques, et la valeur de la résistance est ajustée *aux environs* de celle de l'impédance apparente de la ligne.

Dans une première mesure, g_1 est en série avec la ligne, g_2 en série

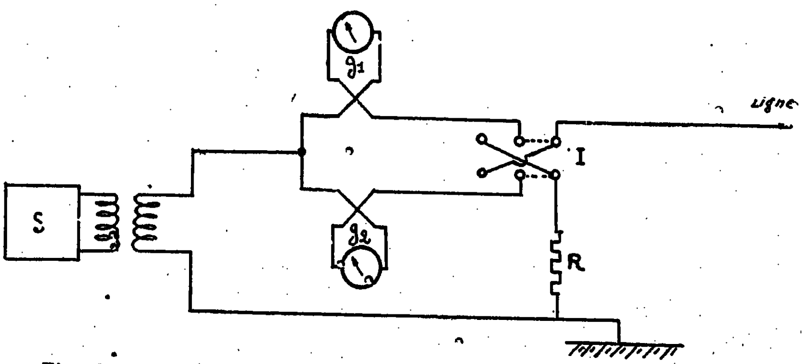


Fig. 6. — Schéma des connexions pour la mesure des impédances apparentes par la méthode de comparaison.

avec la résistance, le poste fournissant une tension d'alimentation U, l'appareil g_1 accuse une déviation θ_1 et g_2 une déviation θ_2; en appelant Z_{app} l'impédance apparente de la ligne :

$$U = Z_{app} K_1 \sqrt{\theta_1} = RK_2 \sqrt{\theta_2}$$

K_1 et K_2 étant respectivement les constantes des appareils g_1 et g_2.

On inverse alors les connexions par l'inverseur I, et si le poste fournit une tension U', g_1 accuse une déviation θ'_1 pendant que g_2 dévie de θ'_2

$$U' = RK_1 \sqrt{\theta'_1} = Z_{app} K_2 \sqrt{\theta'_2}$$

d'où l'on tire

$$Z_{app} = R \sqrt[4]{\frac{\theta_2 \theta'_1}{\theta_1 \theta'_2}}.$$

Cette méthode qui n'est qu'un perfectionnement de la méthode classique dite de comparaison, permet d'éliminer complètement l'étalonnage des appareils thermiques et de s'affranchir des petites variations

de tension inévitables du poste d'alimentation ; elle laisse en particulier la possibilité de shunter les thermocouples par des résistances pour adapter la sensibilité des appareils de mesure aux conditions particulières de chaque expérience. La méthode suppose seulement qu'entre θ_1 et θ'_1 d'une part et entre θ_2 et θ'_2 d'autre part, les déviations des galvanomètres sont proportionnelles aux carrés des intensités ; l'écart entre θ_1 et θ'_1 et entre θ_2 et θ'_2 peut d'ailleurs être réduit autant qu'on le désire.

b) Dans la seconde méthode (fig. 7) la ligne et la résistance R sont encore alimentées en parallèle par la même source à travers deux

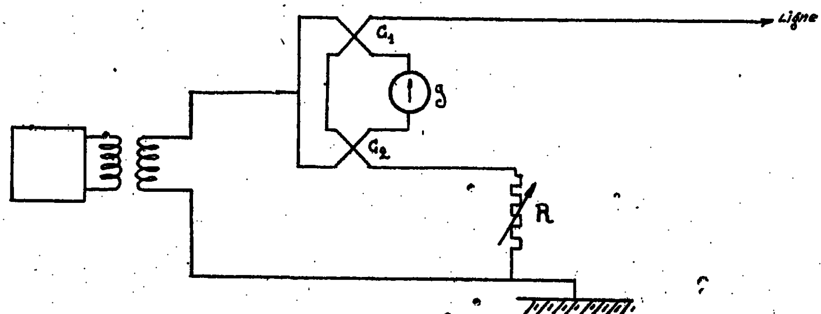


Fig. 7. — Schéma des connexions pour la mesure des impédances apparentes par une méthode de zéro.

couples thermo-électriques C_1 et C_2 dont les bornes secondaires sont connectées en opposition par l'intermédiaire d'un galvanomètre de zéro *g*. La mesure consiste à ajuster la résistance R de telle sorte que le galvanomètre reste au zéro, on a alors évidemment :

$$Z_{app} = R.$$

Cette méthode permet encore de s'affranchir des variations de tension du poste d'alimentation, mais elle nécessite l'emploi de couples c_1, c_2 ayant des caractéristiques rigoureusement identiques.

Les caractéristiques triphasées de la ligne peuvent être mesurées en utilisant une source de tension monophasée alimentant deux fils de la ligne isolée de la terre, le troisième fil étant lui-même isolé. Dans ces conditions, les composantes homopolaires des courants et des tensions à l'origine de la ligne sont nulles, et dans la mesure où la ligne est suffisamment équilibrée pour que les équations 17 et 18 soient applicables, il ne subsiste tout le long de la ligne que des composantes triphasées directes ou inverses de même module. Les impédances mesurées sont alors la somme des impédances directe et inverse de la ligne, et par suite égale au double des impédances triphasées.

De même, les caractéristiques homopolaires peuvent être déterminées en alimentant les trois fils de la ligne groupés en parallèle à l'origine par une source monophasée branchée entre la terre et ces trois fils de ligne. Dans la même hypothèse où le déséquilibre dû à la dissymétrie propre de la ligne est négligeable, il ne subsiste alors tout le long de la ligne que des ondes homopolaires de courants et de tensions.

1° Méthode indirecte par mise en résonance

Une première méthode d'analyse des propriétés d'une ligne peut être trouvée dans le fonctionnement de cette ligne en résonance avec la source de courants qui l'alimente.

En appelant d'une manière générale U et I la tension et l'intensité à l'origine de la ligne de longueur l, on sait que si celle-ci est isolée à son extrémité réceptrice on a :

$$\frac{U}{I} = Z \operatorname{Coth} Kl, \tag{26}$$

Z étant l'impédance caractéristique,
$K = \alpha + j\beta$ la constante de propagation,
α la constante d'atténuation,
$\beta = \frac{2\pi}{L}$ la constante de longueur d'onde.

En appelant V la vitesse de propagation et f la fréquence, $\beta = \frac{2\pi f}{V}$.

Le module de l'impédance apparente $Z_{app} = \left|\frac{U}{I}\right|$ a donc pour expression

$$Z_{app} = |Z| \sqrt{\frac{\operatorname{Cosh} 2\alpha l + \cos 2\beta l}{\operatorname{Cosh} 2\alpha l - \cos 2\beta l}}. \tag{27}$$

Si, par contre, la ligne est mise en court-circuit sur elle-même à son extrémité réceptrice l'impédance apparente est

$$\frac{U'}{I'} = Z \operatorname{Tgh} Kl \tag{28}$$

et a pour module

$$Z'_{app} = |Z| \sqrt{\frac{\operatorname{Cosh} 2\alpha l - \cos 2\beta l}{\operatorname{Cosh} 2\alpha l + \cos 2\beta l}}. \tag{29}$$

En faisant varier la fréquence f de la source d'alimentation, on peut trouver une série de minima et de maxima pour Z_{app} et Z'_{app}.

Dans le calcul de ces maxima et de ces minima on peut d'abord

négliger les variations de $|Z|$ avec la fréquence; l'expérience montrera d'autre part que $\frac{d\alpha}{df}$ est inférieur à 3.10^{-2}; à moins de 1 pour cent près les minima correspondent donc à des valeurs de β telles que

$$\beta = \frac{n\pi}{2l},$$

$n = 1, 3, 5$ .... si la ligne est isolée, et
$n = 2, 4, 6$ .... si la ligne est en court-circuit.

a) En mesurant la fréquence f correspondant à chacun de ces minima, on obtient immédiatement la vitesse de propagation correspondant à cette fréquence

$$\text{(30)} \qquad V = \frac{4f}{n}\, l.$$

b) En mesurant les valeurs de Z_{app} et de Z'_{app} correspondant à ces minima,

$$\text{(31)} \qquad Z_{app} = \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{c\omega} \sqrt{\frac{\text{Cosh } 2\alpha l - 1}{\text{Cosh } 2\alpha l + 1}}$$

le carré de la conductance étant toujours négligeable vis-à-vis de $c^2\omega^2$.

Connaissant β par la mesure précédente, et la capacité linéique c de la ligne, la résolution de ces relations transcendantes permet de déterminer α pour chacune des fréquences f correspondant à une résonance ; on peut d'ailleurs, au moins en première approximation, négliger α^2 vis-à-vis de β^2, l'argument de Z étant toujours très petit.

c) Connaissant α et β on peut alors calculer l'impédance caractéristique

$$\text{(32)} \qquad Z = \frac{\beta - j\alpha}{c\omega} = \frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{c\omega} \underline{\Big|- \text{arctg}\, \frac{\alpha}{\beta}}$$

(ω étant la pulsation correspondant à la fréquence f pour laquelle Z_{app} ou Z'_{app} est minimum)
et en tirer la valeur de la résistance linéique r qui a très approximativement pour valeur

$$r = 2|Z|\alpha \qquad (33)$$

soit $r = \frac{2Z_{app}}{l}$ si αl est suffisamment petit.

La méthode consiste donc à alimenter la ligne par un générateur d'ondes entretenues à tension sensiblement constante et à fréquence réglable ; on fait varier progressivement la fréquence du générateur en observant le courant débité dans la ligne, et on fixe cette fréquence à chacune des valeurs correspondant à un maximum du courant dé-

bité ; on mesure alors la fréquence et l'impédance apparente ; connaissant par ailleurs la capacité linéique, tous les paramètres de propagation peuvent s'en déduire.

Bien entendu le couplage entre le générateur et la ligne doit être réduit au minimum, pour éviter toute réaction. Enfin, pour la mesure du coefficient d'atténuation (équation 31), il est préférable de s'en tenir aux résonances des harmoniques impairs correspondant au cas où la ligne est isolée à l'extrémité, ce qui élimine l'influence perturbatrice toujours plus ou moins marquée d'une seconde prise de terre.

On peut ainsi explorer la ligne pour toutes les fréquences au moins égales à celles correspondant à l'oscillation en quart d'onde de sa longueur totale. En sectionnant la ligne le long de son parcours, et en utilisant les harmoniques successifs, il n'y a pas de limite supérieure théorique à la gamme des fréquences utilisables; toutefois, la limite supérieure pratique ne nous semble pas dépasser 200 000 p:s correspondant à des longueurs d'onde de 1 500 m ; au delà de cette fréquence, les hypothèses admises pour l'établissement des équations linéaires de propagation deviennnent difficiles à conserver, les connexions reliant le générateur à la ligne constituent une hétérogénéité non négligeable, et l'amortissement peut devenir excessif (Cosh $2\alpha l$ *très grand devant l'unité*) pour permettre des mesures précises.

2° Méthode de la ligne chargée

Une seconde méthode récemment indiquée ou rappelée (15) consiste à charger la ligne, par une impédance égale à son impédance caractéristique. Lorsqu'une ligne est chargée à son extrémité réceptrice sur une impédance de valeur connue Z_r, l'impédance apparente de cette ligne à l'origine a pour valeur

$$X = Z \frac{Z_r + Z \operatorname{Tgh} Kl}{Z + Z_r \operatorname{Tgh} Kl}. \tag{34}$$

Si donc on ajuste l'impédance Z_r jusqu'à ce que l'impédance mesurée X ait même valeur que Z_r, on a évidemment :

$$X = Z.$$

Lorsque la valeur cherchée est atteinte, le rapport entre la valeur efficace du courant débité par la source I_g et celle du courant traversant l'impédance Z_r, soit I_r, a alors pour valeur

$$\frac{I_g}{I_r} = e^{\alpha l} \tag{35}$$

d'où la valeur de α connaissant la longueur l de la ligne.

La mesure consiste donc à disposer à l'extrémité réceptrice de la ligne une impédance variable et à mesurer à l'origine l'impédance apparente ; on modifie progressivement la valeur de l'impédance variable jusqu'à ce qu'elle ait même valeur que l'impédance apparente mesurée à l'origine ; à ce moment on mesure aux deux extrémités de la ligne la valeur efficace des courants qui la traversent.

Bien que simple en apparence, cette méthode soulève certaines difficultés d'application au moins en ce qui concerne les fréquences relativement basses pour lesquelles l'argument de l'impédance caractéristique (surtout s'il s'agit de l'impédance caractéristique homopolaire) n'est pas nul ; il est alors nécessaire d'ajuster à la fois le module et l'argument de l'impédance additionnelle.

Si en effet l'impédance Z_r est une résistance pure R, on trouve en développant l'équation 34 que pour des amortissements faibles, c'est-à-dire pour de basses fréquences dans le cas d'une ligne longue, ou pour des lignes courtes dans le cas de fréquences élevées

$$(\mathrm{Cosh}\ 2\alpha l \simeq 1, \quad \mathrm{Sinh}\ 2\alpha l \simeq 0),$$

le module de X a pour expression

$$|X| = |Z| \sqrt{\frac{(p^2+q^2+R^2)+(R^2-p^2-q^2)\cos 2\beta l - 2qR\sin 2\beta l}{(p^2+q^2+R^2)-(R^2-p^2-q^2)\cos 2\beta l + 2qR\sin 2\beta l}}$$

en posant $Z = p + jq$ l'expression sous le radical est maximum ou minimum pour

$$\sin 2\beta l = \pm \frac{2qR}{\sqrt{4q^2R^2 + [R^2 - (p^2+q^2)]^2}}$$

et l'expression prouve que pour des valeurs de $\sin 2\beta l$ voisines de l'unité, il n'est pas toujours possible de trouver de valeur de R telle que

$$X = R.$$

Ce n'est que pour des fréquences telles que $\sin 2\beta l = 0$ c'est-à-dire pour des longueurs d'onde

$$L = \frac{4l}{k} \quad (k = 1, 3, 5, \ldots)$$

que l'équation (34) est satisfaite pour

$$|X| = |Z| = R.$$

D'autre part, la mesure de l'atténuation d'après l'équation (35)

soulève aussi quelques difficultés expérimentales pour les faibles amortissements. Outre qu'il est évidemment nécessaire de comparer les constantes des appareils servant à mesurer I_g et I_r aux différentes fréquences utilisées, le fait que le coefficient d'atténuation α soit donné par le logarithme du rapport $\frac{I_g}{I_r}$, enlève toute précision à la mesure ; si par exemple αl est de l'ordre de 10^{-2}, une erreur de l'ordre de 0,5 pour cent sur la mesure de $\frac{I_g}{I_r}$ entraîne une erreur de 50 pour cent sur la détermination de α.

Cette méthode de mesures ne convient donc qu'aux fréquences très élevées pour les lignes courtes, ou qu'aux lignes longues pour les fréquences de valeurs modérées.

3° Méthode des deux impédances

Suivant un procédé que nous avons indiqué antérieurement au cours d'une étude sur la propagation des ondes dans les transformateurs (10), on peut encore mesurer le module de l'impédance caractéristique de la ligne en mesurant successivement pour une même fréquence de tension appliquée, son impédance apparente à circuit ouvert Z_{app} et son impédance apparente en court-circuit Z'_{app}.

En multipliant l'une par l'autre les deux équations 27 et 29, on a en effet :

$$|Z|^2 = |Z_{app}| \,.\, |Z'_{app}|. \tag{36}$$

Cette méthode n'est d'ailleurs précise que si Z_{app} et Z'_{app} sont du même ordre de grandeur. Tant que la constante d'atténuation est assez faible pour que $(\text{Cosh } 2\alpha l - 1)$ soit une petite fraction de l'unité, il faut effectuer les mesures à des fréquences voisines de celles qui correspondent à $\cos 2\beta l = 0$ c'est-à-dire avec des longueurs d'onde $L = \frac{8l}{k}$ $(k = 1,3,5..)$

4° Méthode oscillographique

On peut enfin déduire les paramètres de propagation en chargeant la ligne uniformément sous une tension continue, puis en la déchargeant brusquement à la terre à l'une de ses extrémités et en enregistrant au moyen d'un oscillographe la courbe du courant de décharge en fonction du temps. On obtient ainsi une courbe périodique amortie dont les premières pseudo-périodes contiennent tous les harmo-

niques de l'oscillation libre en quart d'onde de la ligne, mais dont les dernières périodes sont sinusoïdales. De la valeur de la pseudo-période et de la connaissance de la longueur de la ligne, on tire la vitesse de propagation (équation 30) ; on en déduit ensuite, très approximativement, l'impédance caractéristique à partir de la capacité linéique; enfin l'amortissement des dernières oscillations fournit la constante d'atténuation (10).

Pour faire varier la fréquence, il suffit de faire varier la longueur de la ligne : mais la plus basse fréquence correspond évidemment à une longueur d'onde égale à quatre fois la longueur totale de la ligne.

5° Comparaison des différentes méthodes

Parmi ces différentes méthodes, toutes employées dans le cas pratique exposé plus loin, celle qui nous a paru la plus facile à utiliser est la méthode indirecte par mise en résonance.

Cette première méthode offre déjà le très grand avantage de permettre d'effectuer toutes les mesures et toutes les manœuvres à une seule des extrémités de la ligne, tandis que la seconde méthode, consistant à régler une impédance à l'extrémité réceptrice, nécessite des liaisons téléphoniques souvent difficiles à établir, la ligne étudiée ne pouvant servir aux télécommunications pendant les mesures; d'autre part, en ce qui concerne l'étude des constantes homopolaires, elle permet d'isoler du sol une des extrémités de la ligne, et d'éviter ainsi, sans artifices spéciaux, la circulation, soit des courants telluriques, soit des courants induits par des lignes voisines.

Mais ces contingences mises à part, la méthode de résonance nous paraît être celle qui fournit avec le plus de précision la constante d'atténuation dans une gamme très large de fréquences.

On peut lui reprocher de ne fournir la constante de propagation et l'impédance caractéristique qu'à un facteur constant près, égal à la capacité linéique de la ligne, quantité subsidiaire qui n'intervient pas dans les autres méthodes ; mais cette capacité peut être mesurée une fois pour toutes avec une grande précision, et elle n'intervient d'ailleurs que comme une correction de faible valeur dans la détermination de la résistance apparente.

La méthode oscillographique qui n'est d'ailleurs qu'une variante de la précédente, présente le sérieux inconvénient de ne s'appliquer qu'à une gamme relativement très étroite de fréquences.

Nous verrons toutefois que le principal inconvénient des méthodes

par résonance ou oscillographiques provient de la nécessité d'analyser la ligne par tronçons de longueurs décroissantes si l'on désire étendre largement la zone des fréquences utilisées. Chacun de ces tronçons met en jeu une partie du sol qui n'a généralement pas les mêmes propriétés que les parties adjacentes, et si la longueur totale de la ligne fournit les moyennes statistiques qu'il est en fin de compte nécessaire d'obtenir, les mesures effectuées sur des tronçons plus courts peuvent conduire à des résultats assez différents, surtout en ce qui concerne la résistance linéique et par suite la constante d'affaiblissement.

B) Application pratique à une ligne de 112 km. à 220 kV.

1° Caractéristique de la ligne

La ligne ayant servi aux essais est la première artère à 220 kV installée par les soins de la Compagnie du Chemin de fer de Paris à Orléans entre le poste de Chevilly (7 km au sud de Paris) et le poste de Chaingy (près d'Orléans).

La longueur de cette ligne est de 112,2 km. Les conducteurs sont des câbles en aluminium avec âme d'acier; ils comportent 37 brins de même diamètre, dont 30 en aluminium, la section totale ainsi formée étant de 355 mm², et le diamètre extérieur de la corde de 2,44 cm.

Les supports sont des pylônes métalliques, dont le type normal est conforme au profil schématique de la fig. 8. Les distances séparant les différents conducteurs sont respectivement de :

9,2 — 8,5 — et 6 m.

Dans la majeure partie de la ligne, les hauteurs des conducteurs au-dessus du sol, au point d'attache des isolateurs, sont respectivement de :

21,70 — 18,70 — et 24,70 m.

Les pylônes des 28 premiers kilomètres au départ de Chevilly ont 5 mètres de plus que les pylônes normaux.

Un câble de terre en acier d'une section de 60 mm² (19 brins toronnés) et d'un diamètre extérieur de 1,01 cm est amarré au sommet des pylônes.

La distance moyenne des pylônes est de 250 mètres, et la flèche des conducteurs à la température de 45° est de 7,50 m.

La ligne comporte 21 transpositions de conducteurs constituant 7 rotations complètes.

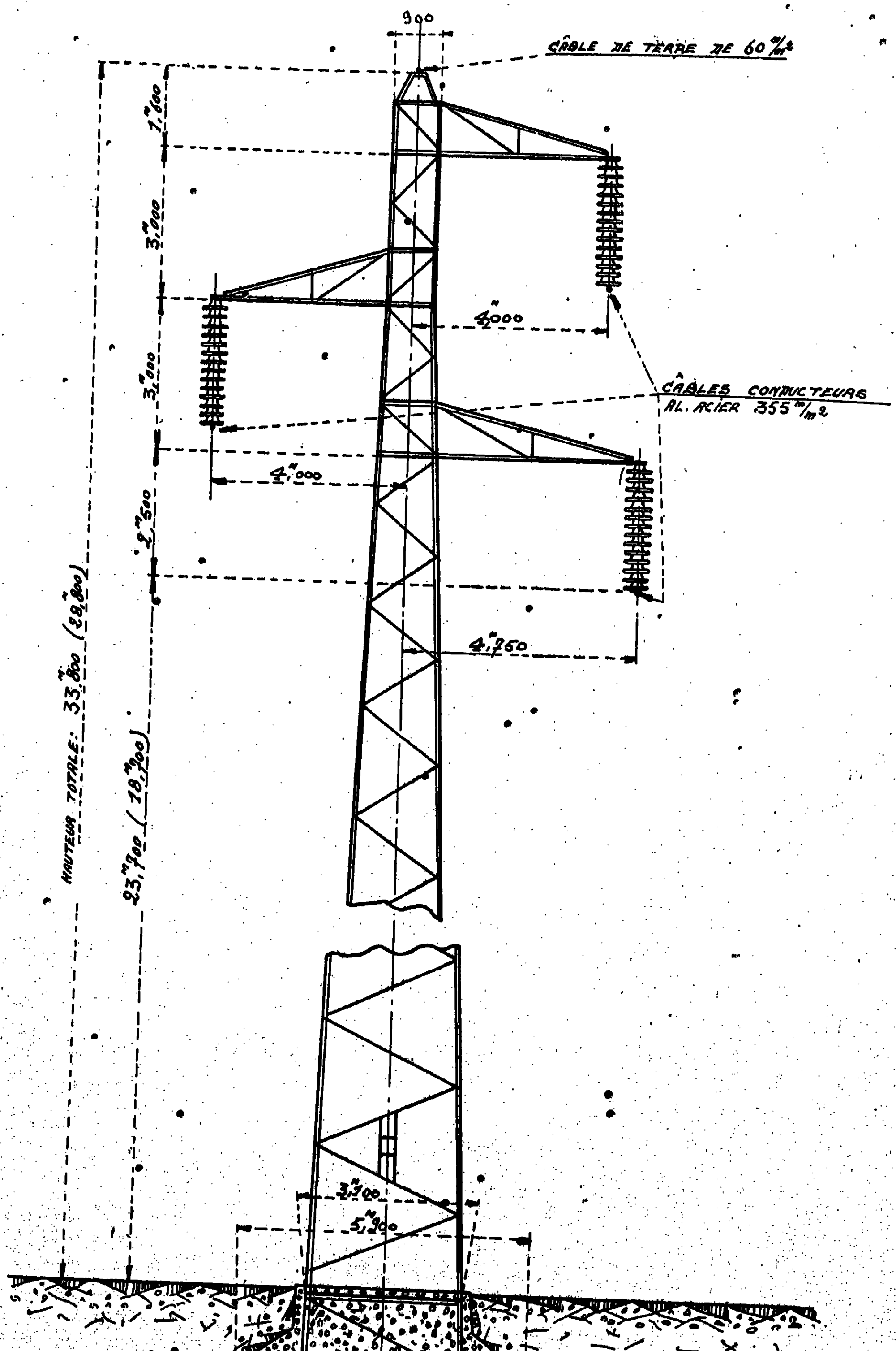


Fig. 8. — Pylône et armements de la ligne aérienne à 220 kV ayant servi aux essais.

Capacités électrostatiques

Les capacités ont été mesurées par les méthodes classiques consistant à déterminer successivement les capacités de chaque conducteur par rapport aux deux autres reliés au sol, puis de deux de ces conducteurs par rapport au troisième relié au sol ; ces mesures montrent que les rotations successives annulent à quelques millièmes près toute dissymétrie entre les capacités pour des longueurs d'ondes très grandes vis-à-vis de la longueur de la ligne (en particulier pour la fréquence industrielle de 50 p:s) et fournissent pour la ligne entière les valeurs suivantes :

Capacité par phase pour des tensions triphasées symétriques = 0,955 microfarad

Capacité des trois phases en parallèle par rapport au sol = 1,925 microfarad

soit, capacité homopolaire par phase

$$\xi_0 = 0{,}642 \text{ microfarad.}$$

Caractéristiques à la fréquence de 50 p:s

Les résistances et réactances de la ligne ont été mesurées par des essais en court-circuit à la fréquence de 50 p:s. Les résultats des mesures ont été corrigés des effets de capacité en utilisant les équations de propagation classiques, les fonctions hyperboliques étant remplacées par leurs développements en série limités aux premiers termes. Pour la ligne entière on trouve ainsi :

Résistance par phase en triphasé symétrique	11,21 ohms
Réactance par phase — — —	47,4 ohms
Résistance homopolaire par phase	35,2 ohms
Réactance homopolaire par phase	138 ohms.

D'après la formule de Carson, la valeur de la réactance homopolaire suppose une conductibilité du sol égale à 3.10^{-13} unités c.g.s. pour la fréquence de 50 p:s.

Les constances linéiques de la ligne sont donc (par km.) :

capacités	triphasée	8,51	10^{-3} microfarad
	homopolaire	5,72	10^{-3} »
résistances	triphasée	0,10	ohm
	homopolaire	0,313	»

inductances	triphasée	1,346	millihenrys
	homopolaire	3,91	»

la conductance latérale est négligeable.

On en déduit, pour la fréquence de 50 p:s :

Impédance caractéristique	triphasée	Z	=	$403 \underline{\vert - 6°37'}$ ohms
	homopolaire	Z_0	=	$840 \underline{\vert - 6°56'}$ ohms
Constante d'affaiblissement	triphasée	α	=	$0,124 \; 10^{-3}$
	homopolaire	α_0	=	$0,186 \; 10^{-3}$
Vitesse de propagation	triphasée	V	=	293 000 km/sec.
	homopolaire	V_0	=	205 000 km/sec.

2° Mesures en fonction de la fréquence

a) *Mesures par mise en résonance de la ligne :* La méthode de résonance a été appliquée d'abord à la ligne tout entière (longueur 112,2 km.), ce qui a permis d'utiliser des fréquences comprises entre 550 et environ 8 000 p:s, puis à un tronçon de 6 000 mètres à partir du poste de Chevilly, la longueur de ce dernier tronçon ayant permis d'étendre les mesures jusqu'à des fréquences voisines de 150 000 p:s.

La source à fréquence variable était constituée par une lampe triode d'une puissance de 100 watts, entretenant des oscillations dans un circuit primaire constitué par une bobine de self inductance en parallèle avec un condensateur variable. La tension anodique de 1 500 V nécessaire au fonctionnement de la lampe était fournie par une dynamo. Une série de bobines permettait de faire varier la self inductance du circuit primaire depuis 0,5 jusqu'à 100 millihenrys, et, au moyen d'un jeu de condensateurs variables, on pouvait ajuster la fréquence du poste d'émission à la valeur voulue.

Les fréquences inférieures à 10 000 p:s (ligne de 112 km) étaient mesurées à l'oscillographe, par comparaison avec une fréquence étalon ; les fréquences supérieures à 10 000 p:s étaient mesurées à l'ondemètre.

Les résistances de comparaison étaient constituées par du fil de manganine de très faible section, et par conséquent sans effet Kelvin appréciable pour les fréquences utilisées; elles étaient bobinées à plat et en zig-zag de manière à annuler la self inductance et à réduire au minimum la capacité entre spires consécutives.

La ligne était couplée au primaire du poste émetteur au moyen

d'une bobine de self inductance négligeable ; les courants dans la ligne et dans les résistances de comparaison étaient mesurés par des thermocouples dans le vide, la déviation totale des galvanomètres étant obtenue pour des courants de l'ordre de quelques milliampères à travers la soudure.

Au poste de Chevilly, la prise de terre était connectée à une forte canalisation d'eau, enterrée à proximité immédiate ; le câble de terre de la ligne était relié à cette prise de terre.

Les tableaux ci-joints contiennent les résultats des mesures et des calculs effectués à partir de celles-ci, le tableau I pour les constantes homopolaires, et le tableau II pour les constantes triphasées.

La courbe de la figure 9 indique la variation de la vitesse de propagation en fonction de la fréquence. Celle-ci croît régulièrement depuis la valeur de 241 000 km:s qu'elle possède à la fréquence de 540 p:s, jusqu'à la valeur limite maximum de 279 000 km:s qu'elle atteint aux environs de 70 000 p:s. Cette augmentation est due principalement à la localisation de plus en plus superficielle des courants de retour dans le sol, et d'une manière accessoire à ce que le terme de correction dû à la résistance linéique devient d'autant plus négligeable que la fréquence est plus élevée ; nous verrons en effet que la résistance linéique croît moins vite que la fréquence.

La limite supérieure de 279 000 km:s s'écarte notablement de la valeur théorique de 300 000 km:s, et l'on doit attribuer cet écart à la présence du câble de terre en acier. Ce câble joue, en effet, le rôle d'écran électrostatique et accroît notablement la capacité linéique de la ligne, tandis que, du fait de sa résistance très élevée, il ne constitue qu'un chemin de retour négligeable pour les courants de haute fréquence : sa présence n'altère pas d'une manière sensible le champ magnétique et par conséquent la valeur de l'inductance linéique apparente.

La valeur limite théorique de la vitesse de propagation, en supposant le sol parfaitement conducteur est d'environ 281 000 km:s.

La figure 10 donne la variation de l'impédance caractéristique homopolaire en fonction de la fréquence ; le carré de la constante d'atténuation α étant négligeable devant le carré de la constante de propagation β, cette courbe est, à un facteur constant près, l'inverse de celle de la vitesse de propagation (fig. 10) ; on a, en effet, d'après l'égalité 32 simplifiée :

$$Z = \frac{\beta}{C\omega} = \frac{1}{cV}.$$

TABLEAU I

Mesure des constantes homopolaires par la méthode de résonance.

Longueur de la ligne.	Fréquence f (p:s)	Rang de l'harmonique n	Vitesse de propagation V_0 (km/sec)	Constante de longueur d'onde	Constante d'atténuation	Impédance caractéristique Z_0 (ohms)	Résistance linéique R_0 (ohms/km.)
112 km. (Hauteur moyenne 16,35 m.)	540	1	242 10^3	14 10^{-3}	0,95 10^{-3}	722	1,37
	1.100	2	247 —	28 —	— —	708	—
	1.700	3	254 —	42 —	2,3 —	688	3,17
	2.270	4	255 —	56 —	— —	686	—
	2.850	5	256 —	70 —	3,9 —	684	5,34
	4.050	7	260 —	98 —	5,03 —	674	6,78
	5.220	9	261 —	126 —	6,06 —	672	8,85
	6.420	11	262 —	154 —	7,75 —	668	10,36
	7.700	13	265 —	182 —	9,2 —	658	12,12
6.600 mètres. (Hauteur moyenne 21,35 m.)	10.150	1	268 —	23,8 10^{-2}	6,8 10^{-3}	653	8,91
	20.700	2	273 —	47,6 —	— —	641	—
	31.300	3	275 —	71,4 —	14,5 —	636	18,63
	52.000	5	275 —	11,9 10^{-1}	21,9 —	636	27,84
	74.000	7	279 —	16,6 —	16,6 —	627	35,95
	95.000	9	279 —	21,4 —	34 —	627	42,6
	120.000	11	279 —	26,2 —	40 —	627	50,1
	13[illegible].000	13	279 —	30,9 —	48,7 —	627	61,0
	158.000	15	279 —	35,7 —	55,8 —	627	69,9

TABLEAU II

Mesure des constantes triphasées par la méthode de résonance.

Longueur de la ligne	Fréquence f (p:s)	Rang de l'harmonique	Vitesse de propagation V (km/sec.)	Constante de longueur d'onde	Constante d'atténuation	Impédance caractéristique Z ohms	Résistance linéique R (ohms/km.)
112,2 km. (Hauteur moyenne 16,3 m.)	655	1	294 10^{3}	14 10^{-3}	0,16 10^{-3}	399	0,13
	1.975	3	295,5 —	42 —	0,33 —	398	0,26
	3.290	5	296 —	70 —	0,46 —	397	0,37
	4.600	7	295 —	98 —	0,68 —	398	0,54
	5.900	9	295 —	126 —	0,81 —	398	0,65
	7.200	11	295 —	154 —	0,89 —	398	0,71
	8.550	13	295 —	182 —	1,13 —	398	0,9
6.600 mètres (Hauteur moyenne 21,3 m.)	11.150	1	295 —	23,8 10^{-2}	1 10^{-3}	398	0,8
	33.500	3	295 —	71,4 —	2,09 —	398	1,66
	55.900	5	295 —	11,9 10^{-1}	2,76 —	398	2,2
	78.200	7	295 —	16,6 —	3,28 —	398	2,62
	100.000	9	295 —	21,4 —	4 —	398	3,18

L'impédance caractéristique homopolaire décroît donc depuis 722 ohms pour 540 p:s jusqu'à la valeur asymptotique de 627 ohms atteinte aux environs de 70 000 p:s. Le câble de terre, en augmentant la capacité électrostatique de la ligne sans accroître son inductance apparente, a pour effet de diminuer la valeur de l'impédance caractéristique homopolaire à toutes les fréquences, et en particulier sa valeur asymptotique ; dans les conditions actuelles et en supposant la terre parfaitement conductrice, l'impédance caractéristique homopolaire serait d'environ 623 ohms; en négligeant encore la résistance du sol, mais en supprimant le câble de terre, l'impédance caractéristique serait d'environ 645 ohms.

La figure 11 donne la valeur de la résistance homopolaire apparente en fonction de la fréquence. Les points mesurés avec le tronçon de la ligne de 6,6 km (courbe 2) ne s'alignent pas sur la courbe relevée avec la ligne tout entière; pour la ligne entière (courbe I) la courbe a pu être prolongée au-delà de 10 000 p:s et jusqu'aux environs de 50 000 p:s grâce aux mesures d'atténuation par la méthode directe dont nous rendrons compte plus loin ; cette divergence entre les deux séries de résultats doit être à notre avis, attribuée à deux causes distinctes dont les effets s'ajoutent :

1° Tout le long du tronçon de 6,6 km les pylônes de la ligne sont surélevés de 5 mètres, et tandis que la hauteur moyenne de la ligne tout entière est d'environ 16 m, celle du tronçon de 6,6 km est d'environ 21 m; 2° tout porte à croire que le long du tronçon de 6,6 km la conductibilité du sol soit nettement supérieure à la conductibilité *moyenne* entre l'origine et l'extrémité de la ligne tout entière. Dans les deux cas, la résistance croît d'ailleurs sensiblement comme la puissance 0,8 de la fréquence.

On doit noter, par ailleurs que si les courbes de résistance en fonction de la fréquence ne sont pas les mêmes pour la ligne tout entière et pour le tronçon surélevé de 6,6 km les valeurs de *l'impédance caractéristique* du tronçon de ligne se trouvent néanmoins sur la courbe qui donne l'impédance caractéristique de toute la ligne en fonction de la fréquence (fig. 10). C'est que l'expression de l'impédance caractéristique ne fait intervenir l'inductance linéique que par sa racine carrée, et la résistance linéique ne s'y introduit que comme une correction négligeable ; comme au delà de 10 000 p:s l'inductance linéique ne varie plus que fort peu en fonction de la fréquence et de la hauteur de la ligne, les deux courbes représentant l'impédance caractéristique

V
3
2
2
27
2
2
2
2
2
2
2
1
1

en fonction de la fréquence doivent se confondre aux erreurs de mesures près.

La figure 12 indique la valeur de la constante d'atténuation en fonction de la fréquence : les courbes de cette figure sont donc les mêmes que celles de la figure 11 dont les ordonnées sont divisées par le double de l'impédance caractéristique.

La figure 13 donne la valeur de la résistance linéique triphasée, par phase et par km, en fonction de la fréquence. Comme pour la résistance homopolaire, et pour des raisons que nous croyons identiques, la résistance linéique du tronçon surélevé de 6,6 km est inférieure à la résistance linéique de la ligne tout entière, et croît moins vite que cette dernière en fonction de la fréquence. Pour la ligne tout entière, la résistance croît comme la puissance 0,84 de la fréquence, tandis que pour le tronçon de 6,6 km, l'accroissement de résistance suit sensiblement la puissance 0,6 de la fréquence. Nous avons tracé sur la même figure, en trait ponctué, la valeur théorique de la résistance d'un cylindre plein de même conductibilité et de même diamètre extérieur que les conducteurs câblés de la ligne. La résistance mesurée est d'abord inférieure à celle de ce conducteur théorique du fait de la subdivision du conducteur réel en 30 conducteurs câblés ; mais au delà de 2 600 p:s, la résistance mesurée dépasse la valeur théorique. La résistance triphasée par phase ayant pour expression

$$r + 4\omega(P - P')$$

où r est la résistance propre du conducteur et P et P′ les termes additionnels dus à la présence du sol, l'accroissement de la résistance apparenté au delà des valeurs calculées en tenant compte du seul effet Kelvin provient en majeure partie de la différence (P — P′) c'est-à-dire des courants de Foucault induits dans la terre. On conçoit dès lors que cet accroissement soit nettement plus élevé pour la ligne tout entière que pour le tronçon surélevé. Une autre cause d'augmentation de la résistance, indiquée par Kennelly (16), peut être attribuée au câblage du conducteur ; les brins constituant le câble étant enroulés en hélice autour de l'axe central en acier, il subsiste au centre du câble une composante axiale du champ magnétique qui modifie la répartition du courant dans les brins, et provoque une augmentation anormale de la résistance.

Les courbes de la figure 14 donnent les valeurs de la constante d'atténuation triphasée en fonction de la fréquence ; ce sont les courbes de la figure 13 dont les ordonnées sont divisées par le double de l'impédance caractéristique triphasée, c'est-à-dire par 800. En comparant

les graphiques des figures 12 et 14, on voit que la constante d'atténuation triphasée est sensiblement dix fois plus petite que la constante d'atténuation homopolaire.

b) Mesures directes par la méthode de la ligne chargée : La méthode de la ligne chargée a été appliquée à la ligne tout entière et au tronçon de 6,6 km en vue de compléter les mesures d'atténuation et de contrôler celles des impédances caractéristiques.

TABLEAU III

Mesure de la constante d'atténuation homopolaire par la méthode de la ligne chargée.

Longueur de la ligne	Fréquence (p:s.)	Résistance branchée à l'intensité réceptrice (ohms par phase)	Rapport des amplitudes des courants	Constante d'atténuation
112,2 km. (Hauteur moyenne 16,35 m.)	2 100	689	1,38	2,87 10^{-8}
	2 700	683	1,44	3,39 —
	5 500	667	2,19	6,95 —
	8 500	657	3,13	10,1 —
	10 000	654	3,31	10,6 —
	13 000	648	5,34	14,9 —
	20 500	640	10,9	21,3 —
	29 500	635	22,35	27,7 —
	41 000	632	43,5	33,8 —
6,6 km. (Hauteur moyenne 25,35 m.)	52 000	630	1,15	21
	75 000	627	1,23	30
	90 000	627	1,24	32
	110 000	627	1,28	38
	160 000	627	1,43	55
	235 000	627	1,70	81
	270 000	627	1,75	85

Le tableau III contient les résultats de mesures pour la constante d'atténuation homopolaire, et les points relevés sont portés sur les graphiques de la figure 12 en même temps que ceux qui ont été déterminés par la méthode de résonance ; la concordance des résultats obtenus par les deux méthodes est satisfaisante.

En ce qui concerne l'impédance caractéristique, la nouvelle méthode de mesures fournit une série de points situés de part et d'autre

des courbes relevées par la méthode de résonance, mais l'écart entre les nouveaux points et la première courbe atteint pour certaines fréquences une amplitude qui dépasse de beaucoup les erreurs fortuites de mesure.

TABLEAU IV

Impédance homopolaire apparente de la ligne en haute fréquence.

Fréquence f (p.: s.)	Impédance apparente Z_{app} (ohms)	Impédance caractéristique Z_0 (ohms)	$\frac{Z_{app} - Z_0}{Z_0}$ pour cent
105 000	627	627	0
108 000	621	—	— 1
110 500	645	—	+ 2,9
116 500	636	—	+ 1,4
124 000	618	—	— 1,4
128 000	618	—	— 1,4
133 000	612	—	— 2,4
138 600	636	—	+ 1,4
145 800	639	—	+ 1,9
153 000	688	—	+ 8,4
160 000	681	—	+ 8,6
172 000	666	—	+ 6,2
181 000	630	—	+ 0,4
198 000	594	—	— 5,3
210 000	585	—	— 6,7
225 000	618	—	— 1,4
236 000	669	—	+ 6,7
253 000	639	—	+ 1,9
269 000	669	—	+ 6,7
292 000	660	—	+ 5,3

Le tableau IV renferme une série de résultats obtenus sur la ligne tout entière chargée à son extrémité par une résistance variable : aux fréquences élevées, l'amortissement devient si grand que l'impédance apparente mesurée à l'origine devient indépendante de la valeur de la résistance branchée à l'extrémité réceptrice, mais cette impédance apparente varie encore dans des limites assez importantes avec la fréquence. Cette variation de l'impédance apparente avec la fréquence est encore plus accusée pour les mesures effectuées entre deux conducteurs (impédance triphasée) que pour celles qui ont été faites entre les trois conducteurs en parallèle et la terre (impédance homopolaire) ; on ne peut donc en attribuer la cause à une variation de la conductibi-

lité apparente du sol en fonction de la fréquence, bien que cette variation existe réellement, tout au moins pour les très hautes fréquences (17) ; nous croyons devoir expliquer cette anomalie par l'hétérogénéité de la ligne proprement dite dont les conducteurs sont inégalement écartés et transposés de place en place. Chaque transposition constitue un point de réflexion partielle des ondes, et pour certaines fréquences des résonances locales apparaissent ; la constante d'atténuation étant dix fois moins élevée pour la propagation entre fils qu'entre les conducteurs et la terre, c'est dans le premier cas que ces résonances locales

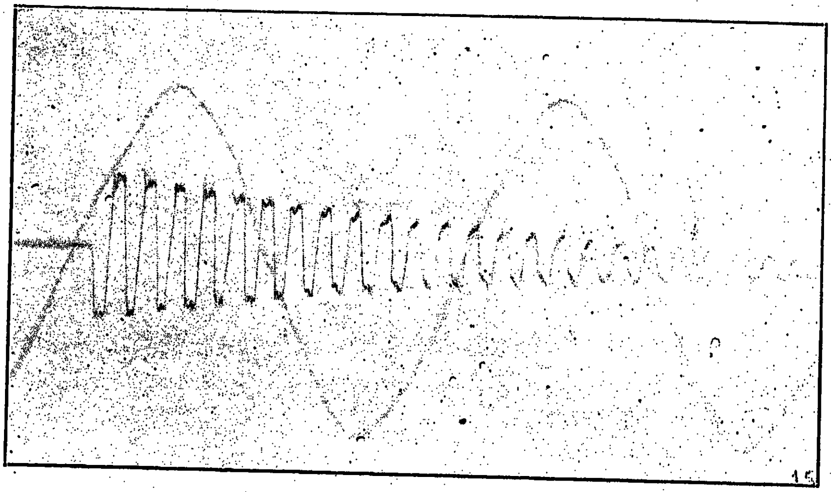


Fig. 15. — Oscillogramme représentant le courant de décharge d'un conducteur sur le conducteur voisin.

apparaissent avec plus d'amplitude (1). Les points de transpositions sont trop irrégulièrement espacés le long de la ligne pour que l'on puisse prévoir ou même distinguer une loi de variation de l'impédance apparente, mesurée à l'origine, en fonction de la fréquence. Lors des essais indirects par la méthode de résonance, ces résonances partielles se trouvent masquées par la résonance générale de la ligne, ce qui explique la continuité quasi parfaite de la courbe relevée (fig. 10).

c) *Oscillation libre de la ligne.* — L'oscillogramme de la figure 15 a été relevé en enregistrant l'oscillation libre de deux conducteurs, isolés du sol, préalablement chargés sous une différence de potentiel de ± 40 V, et brusquement reliés à l'origine de la ligne à travers l'équipage de l'oscillographe.

(1) Ces résonances « anormales » des tensions directes et inverses sont d'ailleurs mises en évidence par la seconde racine double de l'équation caractéristique (voir équation 11, chapitre I, p. 10).

La fréquence de l'oscillation libre est d'environ 650 p:s, et le décrément logarithmique γ est très voisin de 0,08. L'inductance linéique étant de 1,34 millihenrys, ce décrément correspond à une constante d'atténuation $\alpha = \frac{\gamma}{4l}$ égale à $0.17.10^{-3}$ au lieu de $0,19.10^{-3}$ mesurés par la méthode de résonance.

L'oscillogramme de la figure 16 représente l'oscillation libre des trois phases en parallèle par rapport à la terre ; les trois phases

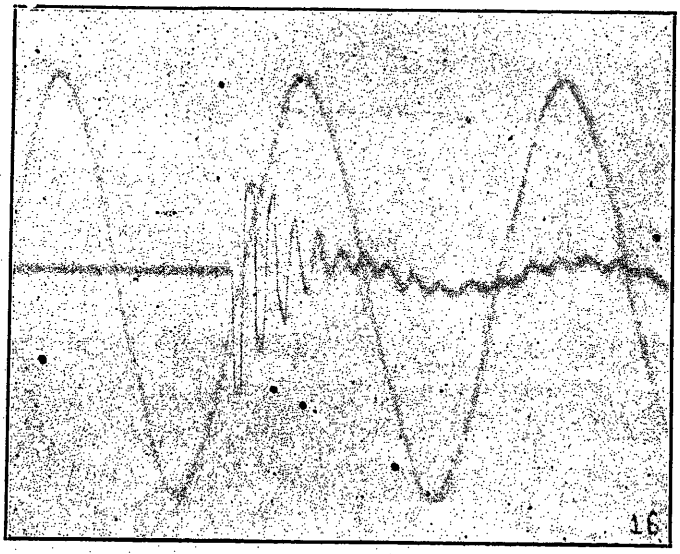


Fig. 16. — Oscillogramme représentant le courant de décharge à la terre des trois phases soumises à la même différence de potentiel initiale.

préalablement chargées par rapport au sol sous une tension d'environ 40 V étaient brusquement reliées à la terre à l'origine de la ligne à travers l'équipage de l'oscillographe.

La fréquence de l'oscillation libre est d'environ 540 p:s, et son décrément logarithmique γ_0 voisin de 0,4, ce qui correspond à une constante d'atténuation $\alpha_0 = \frac{\gamma_0}{4l}$ de $0,895.10^{-3}$ au lieu de $0,95.10^{-3}$ mesurés par la méthode de résonance.

Dans ce dernier oscillogramme l'oscillation libre s'enveloppe autour de la courbe d'un courant résiduel induit par une ligne voisine, ce courant ayant une fréquence fondamentale de 50 p:s auquel se superpose un harmonique de rang 9 assez accentué.

3° Comparaison des résultats expérimentaux avec ceux fournis par la formule de Carson (19).

Nous avons calculé les divers paramètres de propagation des ondes homopolaires d'après les formules établies par Carson :

1° En supposant que la conductibilité du sol est constante, hypothèse qui se trouve à la base même de la théorie ;

2° En appliquant les formules Carson, mais donnant à la conductibilité du sol une valeur inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence. Cette dernière manière de faire, purement empirique, a permis d'accorder la théorie avec l'expérience au cours d'un certain nombre de mesures de mutuelle inductance entre lignes parallèles (14 et 18).

Dans le premier cas la conductibilité du sol σ a été prise égale à 3.10^{-13} unités c.g.s., valeur tirée de la mesure de la réactance homopolaire apparente pour la fréquence de 50 p:s. Dans le second cas on a pris pour σ l'expression

$$\sigma = \frac{21{,}2.10^{-13}}{\sqrt{f}}$$

qui se ramène à la valeur mesurée $\sigma = 3.10^{-13}$ pour $f = 50$ p:s.

Les valeurs de l'impédance caractéristique homopolaire et de la résistance linéique homopolaire ainsi calculées ont été reportées sur les figures 10 et 11, ce qui permet de les comparer directement avec les résultats expérimentaux.

a) *Impédance caractéristique* (fig. 10). La courbe calculée en supposant σ constant suit une loi tout à fait comparable à celle de la courbe expérimentale, et l'écart maximum entre ces deux courbes qui a lieu entre 500 et 1 000 p:s ne dépasse pas 4,5 pour cent de la valeur expérimentale. Au contraire la courbe calculée en donnant à σ des valeurs inversement proportionnelles à la racine carrée de la fréquence présente une pente tout à fait insuffisante; pour des fréquences dépassant 500 000 p:s, elle est encore fort loin de la valeur asymptotique que la courbe expérimentale atteint aux environs de 70 à 80 000 p:s ; l'écart maximum entre la courbe ainsi calculée et les valeurs mesurées dépasse 14,5 pour cent.

b) *Résistance homopolaire* (fig. 11). Pour la ligne tout entière (hauteur moyenne 16,35 m) la courbe calculée en supposant σ constant se confond très sensiblement avec la courbe expérimentale, avec une approximation dépassant 10 pour cent au point d'écart maxi-

mum. Au contraire la courbe calculée en supposant que σ croît en raison inverse de la racine carrée de la fréquence présente un coefficient angulaire beaucoup trop élevé ; elle conduirait à supposer que la résistance apparente croît proportionnellement à la fréquence, tandis que la courbe expérimentale montre que cette résistance n'augmente que suivant la puissance 0,8 de la fréquence. L'écart maximum observé entre la courbe ainsi calculée et les valeurs mesurées atteint 100 pour cent à la fréquence de 40 000 p:s, et augmenterait encore selon toute vraisemblance s'il avait été possible de pousser plus loin les mesures de résistance.

En ce qui concerne le tronçon de ligne surélevé (hauteur moyenne 21,35 m) la concordance entre la courbe expérimentale et la courbe calculée en supposant σ constant est beaucoup moins satisfaisant que pour la ligne tout entière : on peut raisonnablement en conclure que la conductibilité apparente du sol est supérieure à 3.10^{-13} unités c.g.s. le long du tracé de ce tronçon.

On peut donc conclure qu'au moins dans ce cas particulier, et pour la ligne considérée, le calcul empirique consistant à utiliser les formules de Carson dans lesquelles on donne à σ une valeur inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence, conduit à des résultats très éloignés de la réalité.

Au contraire, les formules de CARSON appliquées correctement c'est-à-dire en donnant à σ une valeur constante (hypothèse à la base des calculs qui servent à établir ces formules), fournissent tant pour l'impédance caractéristique que pour la résistance apparente des valeurs très sensiblement conformes à nos résultats expérimentaux.

IV. — CALCUL DES COURANTS A L'ORIGINE ET A L'EXTREMITE D'UNE LIGNE AFFECTEE DE COURTS-CIRCUITS OU DE DEFAUTS D'ISOLEMENT

Nous nous proposons maintenant d'étudier le cas spécial d'une ligne de transport d'énergie d'une longueur quelconque alimentée à une de ses extrémités par une source polyphasée équilibrée, et débitant à son extrémité opposée sur un système récepteur constitué par des impédances de valeurs connues. Nous supposerons qu'en un point quelconque de cette ligne se produit un défaut dissymétrique, c'est-à-dire :

soit un court-circuit entre deux phases,

soit une mise à la terre d'une seule phase,

soit la mise à la terre de deux phases.

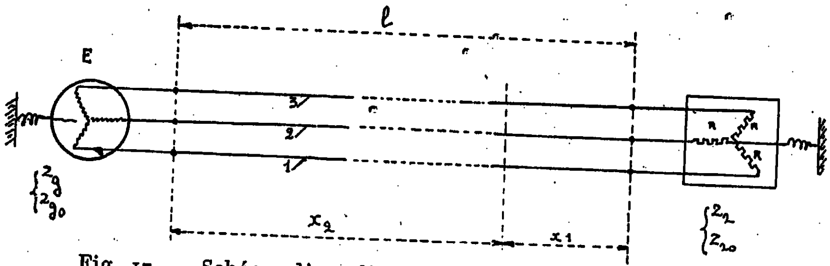


Fig. 17. — Schéma d'une ligne triphasée de longueur totale l reliant une source E à un récepteur R.

Nous utiliserons pour ce calcul les équations générales 17 et 18 établies dans la première partie, en nous rappelant que nous avons appelé :

$K = \alpha + j\beta$ la constante de propagation triphasée ;

$K_0 = \alpha_0 + j\beta_0$ la constante de propagation homopolaire ;

Z l'impédance caractéristique triphasée ;

et Z_0 l'impédance caractéristique homopolaire de la ligne.

Nous désignerons de plus par l la longueur totale de la ligne (figure 17), par x_1 la distance séparant le défaut de l'extrémité réceptrice, et par $x_2 = l - x_1$ la distance séparant le défaut de l'extrémité génératrice.

Nous appellerons enfin Z_g et Z_{g0} les impédances que possède la géné-

ratrice respectivement pour les composantes triphasées (directes et inverses) et homopolaire des courants, Z_r et Z_{r_0} les impédances analogues du récepteur, et E la force électromotrice de la source polyphasée équilibrée (dans la phase 1 prise comme origine).

Si, par exemple, le circuit récepteur est composé de trois impédances égales R reliées en étoile, sans mutuelle inductance entre elles, le point neutre de l'étoile étant relié au sol par une impédance R_0 :

son impédance triphasée sera $Z_r = R$.

et son impédance homopolaire (par phase) $Z_{r_0} = R + 3R_0$.

1. — La ligne n'est soumise a aucun défaut d'isolement

Nous rappellerons d'abord les valeurs que possèdent les courants en régime normal, c'est-à-dire lorsque la ligne n'est soumise à aucun défaut d'isolement. Dans ce cas, les composantes inverses et homopolaires des tensions et des courant sont nulles tout le long du circuit, et les courants et les tensions réels répondent aux équations classiques bien connues :

$$\text{(37)} \qquad \begin{cases} I_{gn} = I_{rn}\left(\operatorname{Cosh} Kl + \dfrac{Z_r}{Z} \operatorname{Sinh} Kl\right) \\ E - Z_g I_{gn} = I_{rn}(Z_r \operatorname{Cosh} Kl + Z \operatorname{Sinh} Kl), \end{cases}$$

I_{gn} étant le courant normal dans le générateur, et I_{rn} le courant normal dans le récepteur.

On tire de là

$$\text{(38)} \qquad \begin{cases} I_{gn} = E \dfrac{\operatorname{Cosh} Kl + \dfrac{Z_r}{Z} \operatorname{Sinh} Kl}{(Z + Z_g) \operatorname{Cosh} Kl + \left(Z + \dfrac{Z_g Z_r}{Z}\right) \operatorname{Sinh} Kl} \\ \text{et} \\ I_{rn} = \dfrac{I_{gn}}{\operatorname{Cosh} Kl + \dfrac{Z_r}{Z} \operatorname{Sinh} Kl}. \end{cases}$$

Deux cas importants sont à envisager :

a) la ligne est ouverte à son extrémité libre ($Z_r = \infty$)

$$\text{(39)} \qquad \begin{cases} I_{gn} = \dfrac{E}{Z} \dfrac{\operatorname{Sinh} Kl}{\operatorname{Cosh} Kl + \dfrac{Z_g}{Z} \operatorname{Sinh} Kl} \\ I_{rn} = 0. \end{cases}$$

soit, pour $Z_g = 0$

$$(40) \quad \begin{cases} I_{gn} = \dfrac{E}{Z} \operatorname{Tgh} Kl. \\ \text{et} \\ |I_{gn}| = \dfrac{E}{|Z|}\sqrt{\dfrac{\operatorname{Cosh} 2\alpha l - \cos 2\beta l}{\operatorname{Cosh} 2\alpha l + \cos 2\beta l}}, \end{cases}$$

et pour $Z_g = Z$

$$(41) \quad \begin{cases} I_{gn} = \dfrac{E}{Z} e^{-Kl} \operatorname{Sinh} Kl \\ |I_{gn}| = \dfrac{E}{|Z|} \dfrac{\sqrt{1 + e^{-4\alpha l} - e^{-2\alpha l} \cos 2\beta l}}{2}. \end{cases}$$

b) L'impédance triphasée du récepteur est égale à l'impédance caractéristique triphasée de la ligne $Z_r = Z$

$$(42) \quad \begin{cases} I_{gn} = \dfrac{E}{Z + Z_g} \\ I_{rn} = \dfrac{E}{Z + Z_g} e^{-Kl}. \end{cases}$$

soit, pour $Z_g = 0$

$$(43) \quad \begin{cases} |I_{gn}| = \dfrac{E}{|Z|} \\ |I_{rn}| = \dfrac{E}{|Z|} e^{-\alpha l}. \end{cases}$$

et pour $Z_g = Z$

$$(44) \quad \begin{cases} |I_{gn}| = \dfrac{E}{2|Z|} \\ |I_{rn}| = \dfrac{|Z|}{2E} e^{-\alpha l}. \end{cases}$$

Ces résultats classiques nous serviront ultérieurement.

2° Deux phases de la ligne sont mises en court-circuit.

Soient alors :

I_{gd} la composante directe des courants dans le générateur.

I_{gi} la composante inverse » » » »

I_{rd} la composante directe des courants dans le récepteur.

I_{ri} la composante inverse » » » »

I_{fd} la composante directe des courants près du défaut, vers le récepteur;

I_{ri} la composante inverse des courants près du défaut, vers le récepteur.

I'_{fd} la composante directe des courants près du défaut, venant du générateur.

I'_{fi} la composante inverse des courants près du défaut, venant du générateur.

I_e le courant de défaut.

V_{fd} la composante directe des tensions à l'endroit du défaut.

V_{fi} la composante inverse des tensions à l'endroit du défaut.

Entre l'endroit du défaut et l'extrémité réceptrice, distants de x_1, les équations des courants et des tensions sont, d'après 17 et 18 :

1° pour le système direct

$$(45)\qquad \begin{cases} I_{fd} = I_{rd}\left(\operatorname{Cosh} Kx_1 + \dfrac{Z_r}{Z} \operatorname{Sinh} Kx_1\right) \\ V_{fd} = I_{rd}(Z_r \operatorname{Cosh} Kx_1 + Z \operatorname{Sinh} Kx_1). \end{cases}$$

2° pour le système inverse

$$(46)\qquad \begin{cases} I_{fi} = I_{ri}\left(\operatorname{Cosh} Kx_1 + \dfrac{Z_r}{Z} \operatorname{Sinh} Kx_1\right) \\ V_{fi} = I_{ri}(Z_r \operatorname{Cosh} Kx_1 + Z \operatorname{Sinh} Kx_1). \end{cases}$$

Entre la source et l'endroit du défaut distants de x_2, les équations des courants et des tensions sont :

1° pour le système direct

$$(47)\qquad \begin{cases} I_{gd} = I'_{fd} \operatorname{Cosh} Kx_2 + \dfrac{V_{fd}}{Z} \operatorname{Sinh} Kx_2 \\ E - Z_g I_{gd} = V_{fd} \operatorname{Cosh} Kx_2 + Z I'_{fd} \operatorname{Sinh} Kx_2. \end{cases}$$

2° pour le système inverse

$$(48)\qquad \begin{cases} I_{gi} = I'_{fi} \operatorname{Cosh} Kx_2 + \dfrac{V_{fi}}{Z} \operatorname{Sinh} Kx_2 \\ - Z_g I_{gi} = V_{fi} \operatorname{Cosh} Kx_2 + Z I'_{fi} \operatorname{Sinh} Kx_2. \end{cases}$$

Enfin, à l'endroit du défaut, les tensions des deux phases court-circuitées sont égales, d'où

$$(49)\qquad V_{fd} = a^2 V_{fi} \qquad \left(\text{avec } a = e^{j\frac{2\pi}{3}}\right)$$

et les courants avant et après le défaut diffèrent de I_e dans la phase 1 et de $- I_e$ dans la phase 2, d'où

$$(50)\qquad \begin{cases} I'_{fd} = I_{fd} + I_e \dfrac{1 - a^2}{3} \\ I'_{fi} = I_{fi} + I_e \dfrac{1 - a}{3}. \end{cases}$$

De ces onze équations, tirons les valeurs des composantes inverses des courants à la source I_{gi} et au récepteur I_{ri}, on trouve

$$(51)\quad \begin{cases} I_{gi} = -\dfrac{aEZ}{2}\,\dfrac{\text{Cosh}\,Kx_1 + \dfrac{Z}{Z_r}\,\text{Sinh}\,Kx_1}{[Z_g\,\text{Cosh}\,Kx_2 + Z\,\text{Sinh}\,Kx_2]\left[\left(Z + \dfrac{ZZ_g}{Z_r}\right)\text{Cosh}\,Kl + \left(\dfrac{Z^2}{Z_r} + Z_g\right)\text{Sinh}\,Kl\right]} \\[2ex] I_{ri} = \dfrac{E}{2}\,\dfrac{\dfrac{Z}{Z_r}}{\left(Z + \dfrac{ZZ_g}{Z_r}\right)\text{Cosh}\,Kl + \left(\dfrac{Z^2}{Z_r} + Z_g\right)\text{Sinh}\,Kl.} \end{cases}$$

1er *Cas* $Z_r = \infty$.

Envisageons le cas où la ligne est ouverte à son extrémité libre, on trouve alors

$$(52)\quad I_{gi} = \frac{E}{2\left(\text{Cosh}\,Kl + \dfrac{Z_g}{Z}.\text{Sinh}\,Kl\right)}\,\frac{\text{Cosh}\,Kx_1}{Z\,\text{Sinh}\,Kx_2 + Z_g\,\text{Cosh}\,Kx_2)},$$

et, évidemment, $I_{gi} = 0$.

a) pour $Z_g = 0$

$$(53)\quad |\,I_{gi}\,| = \frac{E}{2\,|\,Z\,|}\sqrt{\frac{2(\text{Cosh}\,2\alpha x_1 + \cos 2\beta x_1)}{(\text{Cosh}\,2\alpha l + \cos 2\beta l)\,(\text{Cosh}\,2\alpha x_2 - \cos 2\beta x_2)}},$$

b) pour $Z_g = Z$

$$(54)\quad |\,I_{gi}\,| = \frac{E}{2\,|\,Z\,|}\,e^{-\alpha(2l - x_1)}\sqrt{\frac{1}{2}\,(\text{Cosh}\,2\alpha x_1 + \cos 2\beta x_1)},$$

Dans les deux cas, la ligne étant ouverte à son extrémité libre, le module de la composante inverse des courants est une fonction trigonométrique de la distance qui sépare le défaut du générateur.

2^{e} *Cas* $Z_r = Z$.

Envisageons le cas où l'impédance du récepteur est égale à l'impédance caractéristique de la ligne : on trouve

$$(55)\quad I_{ri} = \frac{E}{2(Z_g + Z)}\,e^{-Kl} \qquad I_{gi} = I_{ri}\,\frac{e^{Kx_1}}{\text{Sinh}\,Kx_2 + \dfrac{Z_g}{Z}\,\text{Cosh}\,Kx_2}$$

a) pour $Z_g = 0$

$$(56)\quad \begin{cases} |\,I_{gi}\,| = \dfrac{E}{2\,|\,Z\,|}\,\dfrac{e^{-\alpha x_2}}{\sqrt{\dfrac{1}{2}\,(\text{Cosh}\,2\alpha x_2 - \cos 2\beta x_2)}} \\[2ex] |\,I_{ri}\,| = \dfrac{E}{2\,|\,Z\,|}\,e^{-\alpha l} \end{cases}$$

b) pour $Z_g = Z$

(57)
$$\begin{cases} | I_{gi} | = \dfrac{E}{4 \mid Z \mid} e^{-2\alpha x_2} \\ | I_{ri} | = \dfrac{E}{4 \mid Z \mid} e^{-\alpha l}. \end{cases}$$

Dans le cas où les impédances du générateur et du récepteur sont égales à l'impédance caractéristique de la ligne :

1° *le module de la composante inverse des courants débités par le générateur est fonction exponentielle de la distance qui sépare le défaut du générateur.*

2° *le module de la composante inverse des courants parcourant le récepteur est indépendant de la position du défaut le long de la ligne.*

Notons que dans le dernier cas envisagé, particulièrement important, on peut encore écrire, en rapportant les modules des composantes inverses aux modules des courants normaux :

(58)
$$\begin{cases} | I_{gi} | = \dfrac{| I_{gn} |}{2} e^{-2\alpha x_2} \\ | I_{ri} | = \dfrac{| I_{rn} |}{2}, \end{cases}$$

Le module de la composante inverse des courants parcourant le récepteur, en cas de défaut entre deux phases de la ligne, est égal à la moitié du module des courants qui parcourent le récepteur avant l'apparition du défaut.

3) UNE SEULE PHASE DE LA LIGNE EST MISE A LA TERRE

Dans le cas où le défaut affecte l'isolement entre une phase et la terre, apparaissent le long de la ligne des composantes homopolaires des courants et des tensions. Soient donc :

I_{g0} la composante homopolaire des courants à la source.

I_{r0} la composante homopolaire des courants au récepteur.

I_{f0} la composante homopolaire près du défaut vers le récepteur.

I'_{f0} la composante homopolaire près du défaut venant de la source.

V_{f0} la composante homopolaire des tensions à l'endroit du défaut.

Entre l'endroit du défaut et l'extrémité réceptrice, distants de x_1, les équations des composantes homopolaires des courants et des tensions sont :

(59)
$$\begin{cases} I_{f0} = I_{r0}\left(\text{Cosh } K_0 x_1 + \dfrac{Z_{r0}}{Z_0} \text{Sinh } K_0 x_1\right) \\ V_{f0} = I_{r0}(Z_{r0} \text{ Cosh } K_0 x_1 + Z_0 \text{ Sinh } K_0 x_1). \end{cases}$$

Entre la source et l'endroit du défaut, distants de x_2, les équations sont de même

$$(60) \quad \begin{cases} I_{g0} = I'_{f0} \operatorname{Cosh} K_0 x_2 + \dfrac{V_{f0}}{Z_0} \operatorname{Sinh} K_0 x_2 \\ -Z_{g0} I_{g0} = V_{f0} \operatorname{Cosh} K_0 x_2 + Z_0 I'_{f0} \operatorname{Sinh} K_0 x_2. \end{cases}$$

Pour les systèmes directs et inverses, les équations des tensions et des courants sont les mêmes que les équations 45 à 48 du paragraphe précédent.

Par ailleurs à l'endroit du défaut, la tension de la phase 1 est nulle.

$$(61) \qquad V_{f0} + V_{fi} + V_{fd} = 0$$

enfin, les courants avant et après le défaut diffèrent de I_e dans la phase 1, et de zéro dans les phases 2 et 3, I_e étant la valeur du courant dans le défaut, d'où

$$(62) \quad \begin{cases} I'_{fd} = I_{fd} + \dfrac{I_e}{3} \\ I'_{fi} = I_{fi} + \dfrac{I_e}{3} \\ I'_{f0} = I_{f0} + \dfrac{I_e}{3}. \end{cases}$$

Nous ne donnerons pas ici les résultats des calculs de I_{g0}, I_{gi}, I_{r0}, I_{ri} dans le cas le plus général où les impédances de la source et du récepteur sont quelconques, ces résultats étant fort complexes; nous noterons seulement que, dans le cas le plus général, les modules de ces composantes sont des fonctions trigonométriques de la distance qui sépare le défaut de la source ou du récepteur.

Un cas singulier mérite d'être particulièrement retenu : c'est celui où les impédances triphasées du générateur et du récepteur sont égales à l'impédance caractéristique triphasée de la ligne, et où en même temps les impédances homopolaires du générateur et du récepteur sont elles-mêmes égales à l'impédance caractéristique homopolaire de la ligne

$$Z_r = Z_g = Z, \qquad Z_{r0} = Z_{g0} = Z_0$$

les composantes des courants dans les phases du générateur et du récepteur sont alors :

$$(63) \quad \begin{cases} I_{gi} = \dfrac{E}{2(Z_0 + 2Z)} e^{-2Kx_2} \\ I_{g0} = \dfrac{E}{2(Z_0 + 2Z)} e^{-(K+K_0)x_2} \end{cases}$$

$$
(63 \text{ bis}) \quad \left\{ \begin{aligned} |I_{gi}| &= \frac{E}{2\,|Z_0+2Z|}\, e^{-2\alpha x_2} \\ |I_{g0}| &= \frac{E}{2\,|Z_0+2Z|}\, e^{-(\alpha+\alpha_0)x_2} \end{aligned} \right.
$$

$$
(64) \quad \left\{ \begin{aligned} I_{ri} &= \frac{E}{2(Z_0+2Z)}\, e^{-Kl} \\ I_{r0} &= \frac{E}{2(Z_0+2Z)}\, e^{-(K_0x_1+Kx_2)} \end{aligned} \right.
$$

$$
(64 \text{ bis}) \quad \left\{ \begin{aligned} |I_{ri}| &= \frac{E}{2\,|Z_0+2Z|}\, e^{-\alpha l} \\ |I_{r0}| &= \frac{E}{2\,|Z_0+2Z|}\, e^{-(\alpha_0x_1+\alpha x_2)}. \end{aligned} \right.
$$

Dans le cas où les impédances de la source et du récepteur sont respectivement égales aux impédances caractéristiques du même nom de la ligne :

1° *Les modules des composantes inverse et homopolaire des courants débités par le générateur, sont des fonctions exponentielles simples de la distance qui sépare le défaut du générateur.*

2° *Le module de la composante homopolaire des courants qui parcourent le récepteur est une fonction exponentielle simple de la distance qui sépare le défaut du générateur.*

3° *Le module de la composante inverse des courants dans le récepteur est indépendant de la position du défaut le long de la ligne.*

4° *Les modules des composantes inverses des courants dans le générateur et dans le récepteur ne dépendent que du facteur d'affaiblissement α et non pas du facteur d'affaiblissement « homopolaire » α_0.*

En rapportant ces modules à ceux des courants qui parcourent normalement le générateur et le récepteur, en l'absence de tout défaut, on trouve :

$$
(65) \quad \left\{ \begin{aligned} |I_{gi}| &= |I_{gn}|\, \frac{|Z|}{|Z_0+2Z|}\, e^{-2\alpha x_2} \\ |I_{ri}| &= |I_{rn}|\, \frac{|Z|}{|Z_0+2Z|}. \end{aligned} \right.
$$

4) DEUX PHASES DE LA LIGNE SONT EN COURT-CIRCUIT ET MISES A LA TERRE.

Dans le cas où le défaut affecte l'isolement de deux phases par rapport à la terre, les tensions et les courants tout le long de la ligne comprennent les trois composantes directe, inverse et homopolaire,

TABLEAU V

	Ligne sans c. c.		2 phases en c. c.	1 phase à la terre	2 phases à la terre
Courants dans le générateur	$I_{gn} = \frac{E}{2z}$	I_{go}	0	$\frac{E}{2(2z+z_0)} e^{-(\kappa_0+\kappa)x_2}$	$-a^2 \frac{E}{2(2z_0+z)} e^{-(\kappa_0+\kappa)x_2}$
		I_{gi}	$\frac{-aE}{4z} e^{-2\kappa x_2}$	$\frac{E}{2(2z+z_0)} e^{-2\kappa x_2}$	$-a \frac{z_0}{z} \frac{E}{2(2z_0+z)} e^{-2\kappa x_2}$
		I_{gd}	$\frac{E}{2z} + \frac{E}{4z} e^{-2\kappa x_2}$	$\frac{E}{2z} + \frac{E}{2(2z+z_0)} e^{-2\kappa x_2}$	$\frac{E}{2z} + \frac{z_0+z}{z} \frac{E}{2(2z_0+z)} e^{-2\kappa x_2}$
Courants dans le récepteur	$I_{rn} = \frac{E}{2z} e^{-\kappa l}$	I_{ro}	0	$\frac{-E}{2(2z+z_0)} e^{-\kappa l} e^{-(\kappa_0-\kappa)x_1}$	$a^2 \frac{E}{2(2z_0+z)} e^{-\kappa l} e^{-(\kappa_0-\kappa)x_1}$
		I_{ri}	$a \frac{E}{4z} e^{-\kappa l}$	$\frac{-E}{2(2z+z_0)} e^{-\kappa l}$	$a \frac{z_0}{z} \frac{E}{2(2z_0+z)} e^{-\kappa l}$
		I_{rd}	$\frac{E}{4z} e^{-\kappa l}$	$\frac{z_0+z}{z} \frac{E}{2(2z+z_0)} e^{-\kappa l}$	$\frac{z_0}{z} \frac{E}{2(2z_0+z)} e^{-\kappa l}$
Tensions		V_{fo}	0	$\frac{-z_0}{2(2z+z_0)} E e^{-\kappa x_2}$	$a^2 \frac{z_0}{2(2z_0+z)} E e^{-\kappa x_2}$

au défaut	$V_n = \frac{E}{2} e^{-Kx_2}$	V_{fi}	$a \frac{E}{4} e^{-Kx_2}$	$\frac{-z}{2(2z+z_0)} Ee^{-Kx_2}$	$a \frac{z_0}{2(2z_0+z)} Ee^{-Kx_2}$
		V_{fd}	$\frac{E}{4} e^{-Kx_2}$	$\frac{z_0+z}{2(2z+z_0)} Ee^{-Kx_2}$	$\frac{z_0}{2(2z_0+z)} Ee^{-Kx_2}$
Courants près du défaut côté récepteur	$I_{dn} = \frac{E}{2z} e^{-Kx_2}$	I_{fo}	0	$\frac{-E}{2(2z+z_0)} e^{-Kx_2}$	$\frac{a^2E}{2(2z_0+z)} e^{-Kx_2}$
		I_{fi}	$\frac{aE}{4z} e^{-Kx_2}$	$\frac{-E}{2(2z+z_0)} e^{-Kx_2}$	$a \frac{z_0}{z} \frac{E}{2(2z_0+z)} e^{-Kx_2}$
		I_{fd}	$\frac{E}{4z} e^{-Kx_2}$	$\frac{z_0+z}{z} \frac{E}{2(2z+z_0)} e^{-Kx_2}$	$\frac{z_0}{z} \frac{E}{2(2z_0+z)} e^{-Kx_2}$
Courants près du défaut côté générateur	$I'_n = \frac{E}{2z} e^{-Kx_2}$	I'_{fo}	0	$\frac{E}{2(2z+z_0)} e^{-Kx_2}$	$\frac{-a^2E}{2(2z_0+z)} e^{-Kx_2}$
		I'_{fi}	$\frac{-aE}{4z} e^{-Kx_2}$	$\frac{E}{2(2z+z_0)} e^{-Kx_2}$	$-a \frac{z_0}{z} \frac{E}{2(2z_0+z)} e^{-Kx_2}$
		I'_{fd}	$\frac{3E}{4z} e^{-Kx_2}$	$\frac{3z+z_0}{z} \frac{E}{2(2z+z_0)} e^{-Kx_2}$	$\frac{3z_0+2z}{z} \frac{E}{2(2z_0+z)} e^{-Kx_2}$

TABLEAU VI

		2 phases en c. c.	1 phase à la terre	2 phases à la terre
Courants dans le générateur	I_{g1}	$\frac{E}{2z} + \frac{E}{4z}(1-a)e^{-2\kappa x_2}$	$\frac{E}{2z} + \frac{Ee^{-2\kappa x_2}}{2(2z+z_0)}(2+e^{-(\kappa_0-\kappa)x_2})$	$\frac{E}{2z} + \frac{Ee^{-2\kappa x_2}}{4z_0+2z}\left[1+\frac{z_0}{z}(1-a) - a^2e^{-(\kappa_0-\kappa)x_2}\right]$
	I_{g2}	$\frac{aE}{2z} - \frac{E}{4z}(1-a)e^{-2\kappa x_2}$	$\frac{aE}{2z} + \frac{Ee^{-2\kappa x_2}}{2(2z+z_0)}(e^{-(\kappa_0-\kappa)x_2}-1)$	$\frac{aE}{2z} + \frac{aEe^{-2\kappa x_2}}{4z_0+2z}\left[1+\frac{z_0}{z}(1-a^2) - ae^{-(\kappa_0-\kappa)x_2}\right]$
	I_{g3}	$\frac{a^2E}{2z}$	$\frac{a^2E}{2z} + \frac{Ee^{-2\kappa x_2}}{2(2z+z_0)}(e^{-(\kappa_0-\kappa)x_2}-1)$	$\frac{a^2E}{2z} + \frac{a^2Ee^{-2\kappa x_2}}{4z_0+2z}[1-e^{-(\kappa_0-\kappa)x_2}]$
Courants dans le récepteur	I_{r1}	$\frac{E}{4z}(1+a)e^{-\kappa l}$	$\frac{Ee^{-\kappa l}}{2(2z+z_0)}\left[\frac{z_0}{z} - e^{-(\kappa_0-\kappa)x_1}\right]$	$\frac{a^2E}{4z_0+2z}\left[e^{-(\kappa_0-\kappa)x_1} - \frac{z_0}{z}\right]e^{-\kappa l}$
	I_{r2}	$\frac{E}{4z}(1+a)e^{-\kappa l}$	$\frac{Ee^{-\kappa l}}{2(2z+z_0)}\left[a\frac{z_0+(1-a)z}{z} - e^{-(\kappa_0-\kappa)x_1}\right]$	$\frac{a^2E}{4z_0+2z}\left[e^{-(\kappa_0-\kappa)x_1} - \frac{z_0}{z}\right]e^{-\kappa l}$
	I_{r3}	$2a^2\frac{E}{4z}e^{-\kappa l}$	$\frac{Ee^{-\kappa l}}{2(2z+z_0)}\left[a^2\frac{z_0+(1-a^2)z}{z} - e^{-(\kappa_0-\kappa)x_1}\right]$	$\frac{a^2E}{4z_0+2z}\left[e^{-(\kappa_0-\kappa)x_1} + \frac{2z_0}{z}\right]e^{-\kappa l}$
Courant dans le défaut	I_{terre}		$\frac{3E}{2z+z_0}e^{-\kappa x_2}$	$-\frac{6a^2Ee^{-\kappa x_2}}{4z_0+2z}$
	I_{12}	$\frac{E}{2z}(1-a)e^{-\kappa x_2}$		$2a(1-a)\frac{E}{z}e^{-\kappa x_2}\left[\frac{z-a^2z_0}{4z_0+2z}\right]$

Tensions au défaut	V_{f1}	$-a^2 \frac{E}{4} e^{-Kx_2}$	0	0
	V_{f2}	$-a^2 \frac{E}{4} e^{-Kx_2}$	$(1-a) \frac{az - z_0}{2(2z + z_0)} Ee^{-Kx_2}$	0
	V_{f3}	$2a^2 \frac{E}{4} e^{-Kx_2}$	$a(1-a) \frac{az_0 - z}{2(2z + z_0)} Ee^{-Kx_2}$	$3a^2 \frac{z_0}{4z_0 + 2z} Ee^{-Kx_2}$
Courants près du défaut (côté récepteur)	I_{f1}	$-a^2 \frac{E}{4z} e^{-Kx_2}$	$\frac{E}{2(2z + z_0)} \frac{z_0 - z}{z} e^{-Kx_2}$	$\frac{a^2Ee^{-Kx_2}}{4z_0 + 2z}\left[1 - \frac{z_0}{z}\right]$
	I_{f2}	$-a^2 \frac{E}{4z} e^{-Kx_2}$	$\frac{aE}{2z} e^{-Kx_2}$	$\frac{a^2Ee^{-Kx_2}}{4z_0 + 2z}\left[1 - \frac{z_0}{z}\right]$
	I_{f3}	$2a^2 \frac{E}{4z} e^{-Kx_2}$	$\frac{a^2E}{2z} e^{-Kx_2}$	$\frac{a^2Ee^{-Kx_2}}{4z_0 + 2z}\left[1 + \frac{2z_0}{z}\right] = \frac{a^2Ee^{-Kx_2}}{2z}$
Courants près du défaut (côté générateur)	I'_{f1}	$\frac{E}{4z}(3 - a)e^{-Kx_2}$	$\frac{E}{2(2z + z_0)} \frac{5z + z_0}{z} e^{-Kx_2}$	$\frac{E}{z} e^{-Kx_2} - \frac{a^2Ee^{-Kx_2}}{4z_0 + 2z}\left(1 - \frac{z_0}{z}\right)$
	I'_{f2}	$\frac{E}{4z}(3a - 1)e^{-Kx_2}$	$\frac{aE}{2z} e^{-Kx_2}$	$\frac{aE}{z} e^{-Kx_2} - \frac{a^2Ee^{-Kx_2}}{4z_0 + 2z}\left(1 - \frac{z_0}{z}\right)$
	I'_{f3}	$2a^2 \frac{E}{4z} e^{-Kx_2}$	$\frac{a^2E}{2z} e^{-Kx_2}$	$\frac{a^2E}{2z} e^{-Kx_2}$

et les équations générales sont identiques à celles du cas précédent ; seules diffèrent les conditions particulières à l'endroit du défaut.

Les phases 1 et 2 étant mises à la terre, leur tension est nulle à l'endroit du défaut.

$$(66)\quad \left\{\begin{array}{l} V_{f0}+V_{fi}+V_{fd}=0 \\ V_{f0}+a^2V_{fi}+aV_{fd}=0. \end{array}\right.$$

Le long de la phase qui reste isolée, le courant ne subit pas de discontinuité, donc

$$(67)\quad I_{f0}+aI_{fi}+a^2I_{fd}=I'_{f0}+aI'_{fi}+a^2I'_{fd}.$$

Ces trois nouvelles équations particulières jointes aux douze équations générales 45) 46) 47) 48) 59) et 60), permettent de calculer les composantes des courants et des tensions à l'origine de la ligne, à une extrémité réceptrice et à l'endroit du défaut. La solution dans le cas le plus général est sans grand intérêt et est formée par une fonction trigonométrique compliquée de la distance qui sépare l'endroit du défaut des extrémités de la ligne. Nous nous limiterons au cas particulièrement intéressant où les impédances caractéristiques du générateur et du récepteur sont égales à celles de la ligne :

$$Z_{r0}=Z_{g0}=Z_0,\qquad Z_r=Z_g=Z.$$

On trouve alors que les composantes des courants dans le générateur ont pour valeurs

$$(68)\quad \left\{\begin{array}{l} I_{gi}=-a\dfrac{Z_0}{2Z}\dfrac{E}{2Z_0+Z}e^{-2Kx_2} \\ I_{g0}=-\dfrac{a^2}{2}\dfrac{E}{2Z_0+Z}e^{-(K_0+K)x_2} \end{array}\right.$$

celles des courants dans le récepteur sont :

$$(69)\quad \left\{\begin{array}{l} I_{ri}=a\dfrac{Z_0}{Z}\dfrac{E}{2Z_0+Z}e^{-Kl} \\ I_{r0}=\dfrac{a^2}{2}\dfrac{E}{2Z_0+Z}e^{-Kl}e^{-(K_0-K)x_1}. \end{array}\right.$$

et les conclusions sont identiques à celles que nous avons énoncées dans le cas précédent où nous supposions qu'une seule phase était mise à la terre.

Nous avons réuni dans les deux tableaux ci-contre les résultats de tous les calculs ; le tableau V fournit les valeurs des composantes symétriques, et le tableau VI celles des valeurs réelles des courants et des tensions des différentes phases.

THÉORÈME RELATIF A LA PROPAGATION DES COMPOSANTES INVERSES ET HOMOPOLAIRES (20)

En tirant du tableau V d'une part les composantes inverse et homopolaire des courants dans le générateur et dans le récepteur, et d'autre part les composantes homologues des tensions à l'endroit du défaut, on voit immédiatement que dans les trois cas de déséquilibre envisagés, on peut écrire :

$$(70) \quad \begin{cases} I_{ri} = \dfrac{V_{fi}}{Z} e^{-Kx_1} \\ I_{r0} = \dfrac{V_{f0}}{Z_0} e^{-K_0 x_1} \end{cases}$$

et

$$(71) \quad \begin{cases} I_{gi} = -\dfrac{V_{fi}}{Z} e^{-Kx_2} \\ I_{g0} = -\dfrac{V_{f0}}{Z_0} e^{-K_0 x_2}. \end{cases}$$

Tout se passe donc exactement comme si le point de la ligne où se produit le déséquilibre était une source de tensions inverse V_{fi} et homopolaire V_{f0} : les ondes de courant se propagent depuis cette source fictive vers les impédances équilibrées du générateur et du récepteur.

Comme les impédances que présentent le générateur et le récepteur pour les composantes inverses et homopolaires sont égales aux impédances que présente la ligne pour ces mêmes composantes, chaque onde (inverse et homopolaire) se propage sans qu'il y ait réflexion aux extrémités et par conséquent sans onde de retour. On sait que dans de telles conditions, la répartition des amplitudes des courants et des tensions le long de la ligne est purement exponentielle.

Nous indiquerons dans la dernière partie de ce travail, une application pratique et intéressante de cette propriété remarquable.

V. — APPLICATION A LA PROTECTION SELECTIVE DES RESEAUX ELECTRIQUES

Un des problèmes les plus importants que pose la technique des transports d'énergie électrique est celui de la protection sélective des lignes lorsqu'elles sont soumises fortuitement à un court-circuit ou à un défaut d'isolement.

C'est en effet de la solution de ce problème que dépend en très grande partie la parfaite continuité du service exigée de plus en plus par l'importance croissante des réseaux et par l'augmentation continuelle de la capacité de transport spécifique des lignes.

Les solutions provisoires, dont pouvaient autrefois se contenter des réseaux isolés de faible importance, sont incapables de se prêter aux larges interconnexions qui se multiplient de plus en plus en vue d'améliorer l'utilisation du matériel et de rendre possible un aménagement rationnel des ressources naturelles d'un pays.

Il est actuellement universellement admis que les lignes d'un grand réseau doivent être équipées avec un ensemble de disjoncteurs et de relais automatiques qui permette d'éliminer une ligne avariée et celle-là seulement, c'est-à-dire d'assurer une sélection parfaite des déclenchements automatiques, et cela quels que soient la constitution toujours nouvelle du réseau, le nombre d'usines génératrices interconnectées, le sens de circulation des puissances normales, et l'amplitude des courants de court-circuit.

L'expérience a d'ailleurs montré au cours de ces dernières années que si la sélectivité est une qualité que doit nécessairement posséder un système de protection, cette qualité n'est pas encore suffisante et qu'un système de protection idéal doit être instantané.

En dehors des coupures de courant que procurerait un système de protection imparfaitement sélectif, les défauts d'isolement et les courts-circuits qui en résultent ont, en effet, un autre genre de répercussion qui tient à l'instabilité relative des réseaux en régime troublé. Tout court-circuit occasionne une chute de tension plus ou moins accentuée, qui tend à provoquer la rupture du synchronisme entre les différents alternateurs interconnectés ou moteurs alimentés, et l'expérience montre que la proportion de puissance « décrochée »

à la suite d'un court-circuit est d'autant plus faible que la ligne avariée a été plus rapidement coupée. Cela tient à deux raisons principales : la première est d'ordre mécanique et provient de ce que les machines tournantes conservent leur synchronisme grâce à leur inertie si la diminution de couple synchronisant est de durée assez brève ; la seconde est d'ordre électrique et provient de ce que l'abaissement du flux interne des machines augmente avec le temps après l'établissement du court-circuit, et d'autre part de ce que ce flux est d'autant plus long à reprendre sa valeur normale après la coupure du court-circuit que l'on s'est approché davantage du régime stationnaire.

Il est donc indispensable que les techniciens spécialistes en matière de protection de réseaux portent tous leurs efforts vers la réalisation de dispositifs de plus en plus rapides : il nous semble que ce problème doive trouver plusieurs solutions grâce à l'utilisation de courants de haute fréquence superposés au courant normal sur les lignes de transport d'énergie.

La technique de ces « courants porteurs » est actuellement bien au point, et couramment employée pour la téléphonie à grande distance le long des lignes ; leur application à la protection a d'ailleurs d'ores et déjà reçu la sanction de la pratique sur certains réseaux (21), sous une forme à laquelle on peut peut-être reprocher encore une certaine complication mais qui n'en démontre que mieux les possibilités d'utiliser les courants porteurs à la protection sélective instantanée des réseaux.

I. — Avantages et modes d'emploi des courants de haute fréquence en vue de la protection sélective.

Le principal avantage de l'application des courants de fréquence élevée à la protection des réseaux provient de la possibilité de localiser entre deux points précis la propagation de ces « courants porteurs ».

En installant sur les conducteurs d'une ligne, à chacune de ses extrémités, des circuits bouchons accordés pour la fréquence des courants injectés dans cette ligne, la propagation de ces courants porteurs sera limitée à la ligne elle-même, et ne pourra pas se transmettre vers les lignes voisines situées en amont ou en aval. L'utilisation des courants porteurs permet donc de diviser un réseau quelconque, si complexe soit-il, en autant d'éléments simples que l'on désire, et par conséquent d'individualiser chacune des lignes, soit

pour lui faire transmettre un signal (la ligne devient alors un fil pilote pour la fréquence du courant porteur), soit pour mesurer directement et continuellement ses caractéristiques à la fréquence du courant porteur.

On peut donc fonder, sur l'application des courants de haute fréquence, deux familles différentes de systèmes de protection.

La première famille comprendra les systèmes inspirés des dispositifs à fils pilotes, dans lesquels on se servira de la ligne pour transmettre, au moyen de courants de haute fréquence, des signaux destinés à verrouiller ou actionner des relais à distance.

Dans cette famille dont nous avons décrit quelques applications dans une récente publication (22), les appareils essentiels qui véri-

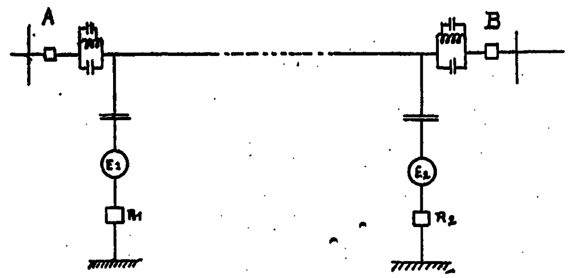


Fig. 18. — Schéma de principe d'une ligne de transmission d'énergie reliant deux postes A et B, et équipée au moyen de sources à haute fréquence destinées à contrôler l'isolement de la ligne.

fient l'état d'isolement de la ligne seront alimentés, comme dans les dispositifs actuellement en usage, par les courants et les tensions *de travail* de la ligne, réduits ou transformés d'une manière quelconque; le contrôle de l'isolement de la ligne sera donc effectué à la fréquence du courant de travail, et les courants porteurs ne serviront que d'instruments de liaison. Nous appellerons les systèmes appartenant à cette famille « dispositifs différentiels à liaisons par courants porteurs ».

La seconde famille sur laquelle nous nous étendrons plus spécialement ici, comprendra les systèmes où le contrôle de l'isolement de la ligne est directement effectué par le courant de haute fréquence lui-même.

Sous une de leurs formes les plus élémentaires ces derniers dispositifs consistent donc à munir les deux extrémités d'une ligne AB (fig. 18) de filtres ou circuits bouchons qui n'offrent qu'une impédance négligeable aux courants de travail de la ligne. A l'extrémité A

de la ligne, on établit une source E_1 de tension alternative de fréquence f_1, et à l'extrémité opposée B, on dispose une source E_2 de fréquence f_2. Les bouchons situés en A et B sont accordés pour les fréquences f_1 et f_2.

Dans ces conditions particulières (fréquences f_1 et f_2 suffisamment basses et ligne AB suffisamment courte) les courants fournis par les sources E_1 et E_2 se réduisent au courant de capacité de la ligne tant que celle-ci est isolée du sol, mais peuvent prendre une amplitude suffisante pour actionner des relais accordés R_1R_2 lorsque la ligne se met à la terre.

On peut, d'une manière plus précise, mesurer à chaque instant aux postes A et B l'impédance apparente de la ligne à la fréquence des courants porteurs f_1 et f_2.

Le fonctionnement de ces dispositifs est donc absolument indépendant du régime d'exploitation du réseau, du sens de circulation et des amplitudes des puissances mises en jeu par les usines interconnectées, de la valeur relative des courants de court-circuit débités par les alternateurs, et de la matière dont est réalisée la mise à la terre du point neutre.

Mais il y a plus. Les relais étant alors actionnés directement par les courants de haute fréquence, on conçoit qu'ils pourront être en action et provoquer l'ouverture des disjoncteurs dès les premières périodes d'établissement de ce courant de haute fréquence, bien avant même que le courant de basse fréquence ait atteint son premier maximum. On peut donc concevoir qu'avec de tels dispositifs il soit possible d'isoler du réseau une ligne avariée avant même que le courant de court-circuit à basse fréquence s'y soit établi.

II. — Inconvénients des dispositifs proposés jusqu'à ce jour.

Si séduisants que soient à première vue ces différents dispositifs, il ne faut pas se dissimuler que leur application pratique à la protection des longues lignes à très haute tension offre des difficultés de réalisation très sérieuses. Lorsqu'il s'agit en effet de lignes à très haute tension, on est encore très limité dans l'état actuel de la technique par le dimensionnement des circuits de couplage et des circuits bouchons, ce qui oblige à utiliser des fréquences d'ondes porteuses relativement élevées, au moins égales à 20 000 p:s par exemple. Or pour des fréquences de cet ordre de grandeur et des lignes quelque peu longues, les phénomènes de propagation des courants le long

des lignes présentent des particularités qui rendent leur application malaisée à la mesure de l'isolement de ces lignes.

Revenons en effet aux équations de propagation le long d'une ligne de longueur l ouverte à son extrémité libre ou munie à cette extrémité de circuits bouchons accordés pour la pulsation ω ; appliquons à l'origine une tension alternative de pulsation ω et d'amplitude U.

a) Si la ligne est à vide, c'est-à-dire isolée du sol tout le long de son parcours, le courant débité par la source a pour valeur efficace

$$I_{ou} = \frac{U}{|Z|}\sqrt{\frac{\text{Cosh } 2\alpha l - \cos 2\beta l}{\text{Cosh } 2\alpha l + \cos 2\beta l}},$$

et son argument est $\varphi - \theta$, θ étant l'argument de l'impédance caractéristique Z et

$$\psi = \text{arctg}\,\frac{\sin 2\beta l}{\text{Sinh } 2\alpha l}.$$

b) Si la ligne est mise en court-circuit à une distance x, le courant débité par la source a pour valeur efficace

$$I_{cc} = \frac{U}{|Z|}\sqrt{\frac{\text{Cosh } 2\alpha x + \cos 2\beta x}{\text{Cosh } 2\alpha x - \cos 2\beta x}},$$

et son argument est $\varphi - \theta$ avec

$$\varphi = -\,\text{arctg}\,\frac{\sin 2\beta x}{\text{Sinh } 2\alpha x}.$$

Si donc un court-circuit se produit à une distance x telle que

$$\frac{\cos 2\beta x}{\cos 2\beta l} = -\frac{\text{Ch } 2\alpha x}{\text{Ch } 2\alpha l},$$

la valeur efficace du courant débité à l'origine par la source de haute fréquence restera inchangée ; d'autre part, les phases des courants I_{ou} et I_{cc} sont elles-mêmes identiques si le court-circuit se produit à une distance x telle que

$$\frac{\sin 2\beta x}{\sin 2\beta l} = -\frac{\text{Sh } 2\alpha x}{\text{Sh } 2\alpha l}.$$

Or étant données les valeurs pratiques que nous avons trouvées pour α, les deux égalités précédentes peuvent se trouver simultanément satisfaites avec une approximation suffisante pour des valeurs de x telles que

$$x = l - (n + 1)\,\frac{L}{4}.$$

L étant la longueur d'onde du courant porteur.

Par conséquent chaque fois qu'un court-circuit se produira à la

distance x définie par la relation ci-dessus, la mesure de la grandeur ou de la phase de l'impédance apparente de la ligne ne pourra pas déceler la présence du court-circuit.

Ces points singuliers ne sont autres que les points nodaux de la tension le long de la ligne lorsque celle-ci est à vide.

La conséquence importante de ces considérations, c'est qu'une protection par onde de contrôle, basée sur la mesure de l'intensité ou de l'impédance, ne peut être envisagée qu'en utilisant une onde dont la longueur soit supérieure à 2 fois la longueur de la ligne à protéger. Pour une ligne aérienne de 50 km, cela conduit à utiliser une fréquence inférieure à 3 000 p:s. ; pour une ligne de 150 km, il faudrait des courants de moins de 1 000 p:s.

Il s'ensuit que dans l'état actuel de la construction des circuits bouchons et des appareils de couplage, de tels dispositifs ne peuvent être utilisés que pour la protection de lignes relativement courtes, ou fonctionnant à des tensions relativement basses.

Pour parer à cette difficulté, on a proposé récemment d'utiliser simultanément deux ondes de contrôle de longueurs différentes ; les longueurs de chacune de ces ondes sont déterminées de telle sorte que leurs points nodaux ne coïncident pas le long de la ligne, afin qu'une mise en court-circuit en un point quelconque affecte au moins l'une des deux ondes au départ de la ligne. Une ligne équipée de la sorte nécessiterait 4 postes de longueurs d'ondes différentes (deux à chaque extrémité).

III. — Application de la propagation sans onde de retour des composantes symétriques.

Toutes ces difficultés peuvent être aplanies si l'on utilise les propriétés développées dans les chapitres précédents, et c'est alors que les théorèmes établis au chapitre IV trouvent une application pratique immédiate.

On peut protéger très simplement une ligne en utilisant un seul poste d'émission à haute fréquence branché à une des extrémités de la ligne, l'autre extrémité étant seulement équipée avec un système récepteur constitué par des impédances mortes, à condition que le poste émetteur soit polyphasé équilibré et que les impédances de l'émetteur et du récepteur soient judicieusement dimensionnées.

Le schéma du dispositif est alors celui qui est représenté par la figure 19.

La ligne triphasée à protéger 1, comprise entre les postes A et B

équipés au moyen de disjoncteurs D et D′, est alimentée à l'une de ses extrémités par un poste d'émission triphasé équilibré à haute fréquence E ; cet émetteur peut être constitué par un alternateur de très faible puissance, ou même par un système de lampes triodes tel que celui qu'a décrit M. Mesny (23) ; cet émetteur est couplé avec la ligne par un système de condensateurs C, et aux deux extrémités de la ligne la propagation des courants injectés par l'émetteur E sont arrêtés par des filtres ou circuits bouchons F. A l'autre extrémité de la ligne, et

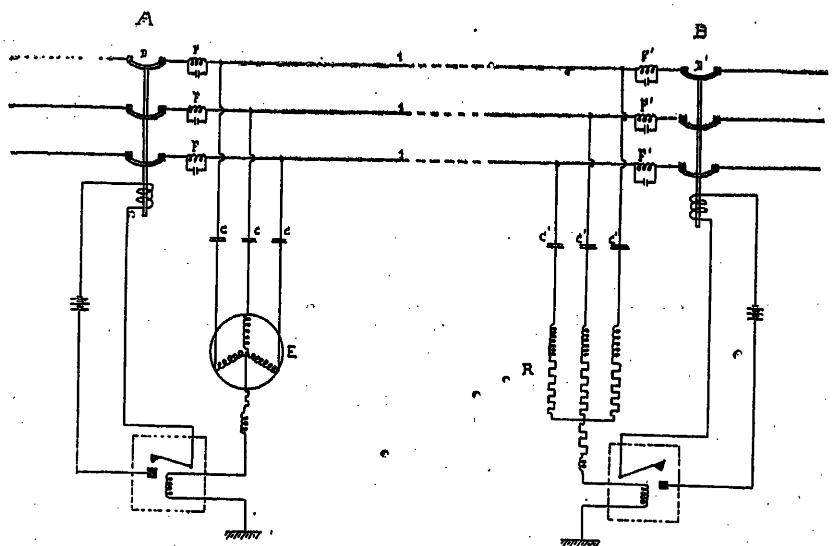


Fig. 19. — Schéma de principe d'un dispositif de protection sélective pour une ligne triphasée.

couplée avec elle par un système de condensateurs C′, on branche un circuit récepteur R constitué par des impédances mortes.

On fait en sorte que les impédances résultantes de l'émetteur E et du récepteur soient égales aux impédances caractéristiques triphasée Z et homopolaire Z_0 de la ligne.

Enfin à chaque extrémité, c'est-à-dire en série avec l'émetteur E et le récepteur R on branche un relais sensible au déséquilibre des courants polyphasés de haute fréquence engendrés par l'émetteur E.

En l'absence de défaut d'isolement ou de court-circuit entre phases le long de la ligne, les composantes inverse ou homopolaire des courants se réduisent à une très faible valeur due seulement au déséquilibre naturel des conducteurs de la ligne. Mais nous avons montré qu'en cas de défaut entre deux phases ou à la terre *en un point quelconque de la ligne :*

1° les composantes inverses et homopolaires des courants débités par le générateur sont des fonctions exponentielles simples de la distance qui sépare le défaut de ce générateur : elles ne s'annulent donc jamais.

2° La composante inverse des courants dans le récepteur est indépendante de la position du défaut.

3° L'affaiblissement des composantes inverses des courants dans le générateur et dans le récepteur ne dépendent que de la constante d'affaiblissement triphasée et non pas de la constante d'affaiblissement homopolaire.

Considérons par exemple une ligne triphasée de 100 km de longueur ayant les caractéristiques suivantes :

$Z = 400$ ohms

$Z_0 = 630$ ohms

$\alpha = 2{,}6.10^{-3}$

$\alpha_0 = 22.10^{-3}$

Rapportées aux courants circulant normalement dans le récepteur et dans l'émetteur, c'est-à-dire en l'absence de tout défaut, les composantes inverses de ces courants auront pour valeurs minima :

	dans le générateur (en centièmes)	dans le récepteur (en centièmes)
Court-circuit entre 2 phases	30	50
Court-circuit entre 2 phases et terre	16,5	27,8
Court-circuit entre 1 phase et terre	23	38

tandis que dans les mêmes conditions les valeurs minima des composantes homopolaires des courants ne dépasseront pas :

	dans le générateur (en centièmes)	dans le récepteur (en centièmes)
Court-circuit entre 2 phases	0	0
Court-circuit entre 2 phases et terre	2,3	4
Court-circuit entre 1 phase et terre	2,05	3,4

On voit donc que l'on aura grand intérêt à détecter non pas la composante homopolaire mais la composante inverse des courants ; non seulement le dispositif sera alors sensible à un court-circuit entre deux

phases n'affectant pas la terre, mais dans tous les cas il ne demandera de la part des relais qu'une sensibilité relativement très faible.

Un poste émetteur ayant une puissance d'une dizaine de watts par phase (soit 30 watts au total) suffira amplement.

Plusieurs dispositifs permettent de détecter simplement le déséquilibre des courants : l'un des plus simples est sans doute celui que schématise la figure 20. En série avec chacune des impédances z_1, z_2, z_3 branchés dans les phases du récepteur et de l'émetteur, on connecte trois impédances z'_1, z'_2, z'_3; ces impédances ont même module, mais l'argument de z'_1 est de — 60°, celui de z'_2 est nul et celui de z'_3 est

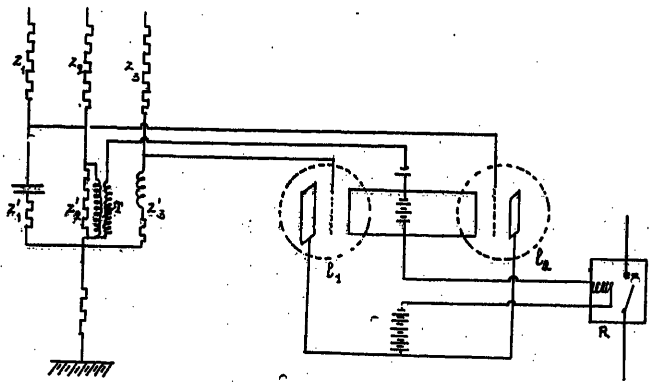


Fig. 20. — Dispositif destiné à détecter la composante inverse des courants dans un système triphasé.

de + 60° ; entre la grille et le filament d'une triode l_1, on applique une différence de potentiel égale à la chute de tension dans l'impédance z'_3 augmentée de la chute de tension dans l'impédance z'_2, cette dernière étant changée de signe par un petit transformateur approprié « T »; de même la grille d'une seconde triode l_2 est portée par rapport à son filament à un potentiel égal à la chute de tension dans l'impédance z'_1 augmentée de la chute de tension changée de signe aux bornes de l'impédance z'_2.

On trouve alors facilement que la grille de l'une des deux triodes est portée, par rapport à son filament, à une tension proportionnelle à

$$(I_i - a^2 I_0), \qquad \left(a = e^{j\frac{2\pi}{3}}\right),$$

I_i et I_0 étant respectivement les composantes inverse et homopolaire des courants,

tandis que la différence de potentiel entre la grille et le filament de

l'autre triode sera proportionnelle à :

$$(I_0 - a^2 I_i)$$

Quelles que soient les valeurs respectives de I_i et de I_0, au moins l'une des deux triodes l_1 et l_2 se trouvera donc excitée : son courant plaque pourra alimenter l'enroulement du relais de déclenchement R de l'interrupteur.

Bien entendu la présence des impédances filtrantes z'_1, z'_2, z'_3 ne doit pas modifier sensiblement l'impédance résultante du générateur et du récepteur ; il faut ou bien leur donner un module négligeable vis-à-vis du module des impédances z_1, z_2, z_3, ou bien modifier en conséquence le module et l'argument de ces dernières impédances.

CONCLUSIONS.

1° Dans le cas le plus général de déséquilibre, les courants périodiques se propageant le long d'une ligne triphasée de transport d'énergie se laissent décomposer en trois systèmes polyphasés symétriques, à savoir : un système à succession de phases directe, un système à succession de phases inverse et un système à succession de phases nulle ou système homopolaire.

Du fait de la dissymétrie propre de la ligne, les courants et les tensions de chaque système se manifestent dans le cas le plus général comme la superposition de six ondes se propageant à des vitesses différentes.

Mais, lorsque la dissymétrie de la ligne n'est pas particulièrement accusée, on peut en première approximation considérer les courants et les tensions de chacun des systèmes comme étant la résultante de quatre ondes ; deux d'entre elles se propagent avec la vitesse dite « triphasée », l'une vers l'extrémité réceptrice, l'autre vers l'extrémité génératrice ; les deux autres se propagent avec la vitesse dite « homopolaire », l'une vers la station réceptrice et l'autre vers la station génératrice.

Enfin, lorsque la dissymétrie propre de la ligne peut être complètement négligée, les courants et les tensions des trois systèmes polyphasés symétriques se manifestent comme étant la superposition de deux ondes, une onde directe et une onde réfléchie. Dans les systèmes à succession de phases directe et inverse, les deux ondes se propagent avec la vitesse « triphasée », et il existe dans chaque phase un même rapport constant, d'une part entre l'onde incidente de tension et l'onde incidente de courant, d'autre part, entre l'onde réfléchie de tension et l'onde réfléchie de courant ; ce rapport est l'impédance caractéristique « triphasée » de la ligne. Dans le système homopolaire, les deux ondes se propagent avec la vitesse « homopolaire », et il existe de même un rapport constant entre les ondes de tension et de courant incidentes et réfléchies ; c'est l'impédance caractéristique « homopolaire » de la ligne. Chacun des systèmes polyphasés compo-

sant est alors régi par l'équation classique de propagation, les paramètres ayant seulement des valeurs différentes pour les systèmes direct et inverse et pour le système homopolaire.

2° D'après les expériences réalisées sur une grande artère de transport d'énergie à 220 kV, les paramètres des équations de propagation se laissent mesurer par différentes méthodes simples, consistant le plus généralement à mesurer l'impédance apparente de la ligne dans des conditions particulières de fonctionnement; la pratique a montré que parmi ces méthodes, celle qui consiste à mettre la ligne en résonance sur son onde fondamentale et sur les partiels successifs de cette onde fondamentale est la plus facile à mettre en œuvre ; elle permet de mesurer directement la résistance apparente de la ligne à différentes fréquences, la vitesse de propagation des ondes, et, indirectement. l'impédance caractéristique et la constante d'atténuation.

La résistance « homopolaire » de la ligne essayée croît sensiblement comme la puissance 0,8 de la fréquence de la source, et par suite des courants induits dans le sol, la résistance apparente « triphasée » augmente plus rapidement avec la fréquence que ne le ferait supposer un calcul tenant compte du seul effet Kelvin dans les conducteurs.

Du fait de la localisation de plus en plus superficielle des courants dans la terre, la vitesse de propagation « homopolaire » croît avec la fréquence jusqu'à une limite supérieure voisine de celle que l'on peut calculer en supposant le sol parfaitement conducteur, compte tenu de la présence du câble de terre qui augmente la capacité électrostatique de la ligne sans modifier sensiblement son inductance apparente.

Enfin, en dehors des conditions de résonance totale de la ligne, les réflexions partielles aux points de transposition des conducteurs inégalement espacés engendrent pour certaines fréquences des résonances locales ou partielles qui ont pour effet de modifier dans une certaine mesure l'impédance apparente de la ligne.

3° Les résultats des mesures effectuées sur les constantes « homopolaires » concordent d'une manière satisfaisante avec les calculs que permettent d'effectuer les formules de Carson, à condition d'attribuer au sol une conductibilité moyenne constante, égale à celle que fournit la mesure de l'inductance apparente de la ligne à la fréquence de 50 p:s.

Au contraire, le calcul souvent admis qui consiste à introduire dans les formules de Carson une conductibilité moyenne du sol inversement proportionnelle à la racine carrée de la fréquence conduit,

dans le cas particulier étudié ici, à des résultats très éloignés de la réalité.

4° L'étude des équations de propagation dans le cas d'une ligne affectée d'un défaut d'isolement dissymétrique entre phases ou à la terre montre que tout se passe comme si le point où se produit le déséquilibre accidentel était une source de tension inverse et homopolaire ; les ondes de courant se propagent depuis cette source fictive vers les impédances équilibrées constituées par le générateur et par le récepteur. En donnant à la fois au générateur et au récepteur des caractéristiques telles que leurs impédances inverse et homopolaire soient respectivement égales aux impédances inverse et homopolaire de la ligne, les ondes de courant constituant les systèmes inverse et homopolaire, issues de la source fictive, se propagent sans réflexion aux deux extrémités ; la répartition des amplitudes des composantes inverses et homopolaires des courants et des tensions de part et d'autre du défaut est alors purement exponentielle. Il en résulte en particulier que le module de la composante inverse des courants dans le récepteur est indépendant de la position du défaut le long de la ligne.

5° Ces propriétés comportent une application pratique immédiate aux systèmes de protection sélective des lignes de transport d'énergie qui consistent à contrôler l'isolement de celles-ci par des courants de haute fréquence superposés au courant industriel de la ligne. On utilise pour chaque ligne à protéger une seule source de haute fréquence polyphasée et un récepteur constitué par des impédances mortes, et on dimensionne ces appareils de telle sorte que leurs impédances résultantes par phase soient égales aux impédances inverses et homopolaires de la ligne ; un relais sensible au déséquilibre des courants de haute fréquence, branché à chaque extrémité, permet alors de déceler tous les défauts d'isolement entre deux phases ou entre une ou deux phases et la terre, quelle que soit la position du défaut.

BIBLIOGRAPHIE

1. — L. STOKVIS. — Sur la création des harmoniques 3 dans les alternateurs par suite du déséquilibrage des phases.
Comptes-rendus, t. 159, p. 46, 6 juillet 1914.

2. — C. L. FORTESCUE. — Symmetrical Coordinates.
Transactions of the A. I. E. E., 1918, p. 629.

3. — J. FALLOU. — Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés.
Bulletin de la Société Française des Electriciens, t. VI, septembre 1926, p. 969.

4. — J. FALLOU. — Mise à la terre du point neutre par l'intermédiaire d'une inductance.
Revue Générale de l'Electricité, 10 mai 1930, p. 739.

5. — J. FALLOU, L. DUPUIS, G. TINEL. — Note sur le système employé par l'Union d'Electricité pour la protection sélective des lignes en parallèle.
Revue Générale de l'Electricité, t. XXIV, 7 juillet 1928, p. 29.

6. — BREVETS FRANÇAIS, n° 630.399 et additions n^{os} 24.396 et 33.820.

7. — V. GENKIN. — Déséquilibre électrique dans les installations polyphasées.
Bulletin de la Société Française des Electriciens. — Rapport présenté à la semaine de discussion de 1925, p. 45.

3. — A. BLONDEL. — Sur l'étude directe des systèmes triphasés déséquilibrés au moyen d'impédances et admittances mutuelles de phases dans les problèmes de chutes de tension et de mise en court-circuit.
Revue Générale de l'Electricité, t. XXIX, 3 janvier 1931, p. 3.

9. — S. BEKKU. — Recherches théoriques sur les problèmes concernant les lignes de transport et plus spécialement le suppresseur d'arc.
Conférence Internationale des Grands Réseaux électriques à haute tension, 1925, t. II, p. 281.

10. — J. FALLOU. — Contribution expérimentale à l'étude des surtensions dans les transformateurs.
Bulletin de la Société Française des Electriciens, t. VI, n° 55, mars 1926, p. 237.

11. — B. FOCACCIA & G. CERILLO. — Déterminazione delle constanti delle linee aeree trifasi per l'applicazione del metodo delle coordinate simmetriche.
Elettrotecnica, t. XV, 15-25 décembre 1928.

12. — J. R. CARSON. — Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return.
The Bell System Technical Journal, t. V, p. 539, octobre 1926.

COLLET. — Le champ magnétique au voisinage d'une ligne électrique à courant alternatif.
Bulletin de la Société Française des Electriciens. t. VII, 1927, p. 604.

J. B. POMEY. — Champ électrique produit en présence du sol par un fil conducteur de courant alternatif.
Revue Générale de l'Electricité, t. XXVIII, 20 décembre 1930, p. 985.

13. — F. POLLACZEK. — Uber die Induktionswirkungen einer Wechselstrom einfachleitung.
Elektrische Nachrichten-Technik, 1926, t. III, n° 9, p. 339.

14. — H. KLEWE. — Gegeninduktivitatsmessungen an Leintungen mit Erdrückleitung.
Elektrische Nachrichten-Technik, 1929, p. 467.

15. — C. A. BODDIE & R. C. CURTIS. — The transmission of High-Frequency Currents for Communication over existing Power Networks.
Transactions of the A. I. E. E., t. XLVIII, 1929, p. 227.

16. — H. ARMAGNAT & L. BRILLOUIN. — Mesures en haute fréquence, édition 1924, p. 164 et sq.

17. — J. A. RATCLIFFE & F. W. G. WHITE. — The Electrical Properties of the Soil at Radio Frequencies.
Philosophical Magazine, t. X, octobre 1930, p. 667.

18. — A. E. BOWEN & C. L. GILKESON. — Mutual Impedances of Ground Return Circuits.
Transactions of the A. I. E. E., t. XLIX, octobre 1930, p. 1370.
E. P. PECK. — Discussion du mémoire ci-dessus. — *Transactions of the A. I. E. E.*, t. XLIX, octobre 1930, p. 1379.

19. — J. FALLOU. — Mesures des constantes de propagation d'une ligne aérienne avec retour par le sol en fonction de la fréquence.
Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences, t. CXCIII, n° 12, 21 septembre 1931, p. 461.

20. — J. FALLOU. — Propagation des courants de haute fréquence polyphasés le long des lignes de transport d'énergie et protection sélective des réseaux électriques.
Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences, t. CXCIII, n° 9, 31 août 1931, p. 395.

21. — L. R. LUDWIG. — Superimposed High-Frequency Currents for Circuit Breaker Control.
Journal of the A. I. E. E., t. XLVII, juin 1928, p. 401.
Electrical World, 22 mars 1930

22. — J. FALLOU. — La protection sélective des réseaux contre les courts-circuits au moyen de courants de haute fréquence.
Bulletin de la Société Française des Electriciens, t. I (5e série), septembre 1931, p. 956.

23. — R. MESNY. — Génération d'oscillations polyphasées au moyen de tubes électroniques.
L'Onde Electrique, t. IV, 1925, p. 232.

LA FOUDRE GLOBULAIRE (1)

Discussion de la communication de M. Mathias

par M. Paul Bunet

La communication de M. Mathias et celle qu'il a déjà faite à la Société, le 8 novembre 1930, dont je ne veux pas méconnaître l'intérêt, se composent de deux parties : l'une est relative à la foudre globulaire et à la réunion de documents à cet égard. Quoi que j'aie à dire de ce côté, faute de temps, je n'en parlerai pas. L'autre partie constitue l'explication de tous les phénomènes de la foudre basée sur une certaine matière fulminante.

Il est du plus haut intérêt de connaître la foudre qui cause à nos réseaux et nos appareils des dommages devenus importants par suite du développement de nos installations. C'est un sujet extrêmement sérieux et qui touche la bonne conservation de nombreuses entreprises. Il y a donc lieu d'examiner de près toutes explications qui nous sont présentées, mais de bien vérifier sur quoi elles reposent afin de ne pas nous égarer dans la recherche indispensable des précautions à prendre. M. Mathias admet que les éclairs sont composés d'une matière fulminante, laquelle est un explosif contenant une énergie, libérable au moment de sa décomposition instantanée, de 3 000 kgm:cm^3. Traduit en unités d'électricien cela fait environ 8 kWh par dm^3.

La foudre a fait l'objet de travaux importants, surtout aux Etats-Unis et à l'école Peek, à laquelle on doit des résultats pratiques importants, basés sur un grand nombre de recherches expérimentales, cette école, dis-je admet 3 kWh au total pour l'énergie que représente un coup de foudre (en ordre de grandeur). Comme un éclair renferme un nombre considérable de décimètres cubes, comme on ne peut imaginer que toute son énergie s'accumule intégralement dans une réaction chimique, on voit apparaître une divergence se chiffrant par un coefficient qui peut être de l'ordre de 10 000, 100 000 même. (Il est vrai que certains auteurs ont admis plus que Peek pour l'énergie

(1) *Bulletin de la Société française des Electriciens,* 4e série, tome X, décembre 1930, p. 1280 et 5e série, tome II, juillet 1932, p. 729.

d'une décharge de foudre, mais pas dans ces proportions, loin de là).

Un autre point qui aurait besoin d'explication est la supposition de cet oxyde d'azote extraordinaire. Je n'ai rencontré aucun chimiste qui pût admettre son existence. Il est tellement différent non seulement des autres oxydes d'azote, mais de tous les corps qu'un chimiste ait jamais pu voir ou soupçonner que, avant de baser sur lui des théories valables, il faudrait avoir quelques bonnes raisons nouvelles.

M. MATHIAS parle de la possibilité de produire artificiellement des arcs chauffant l'air à 3 000° C ; il pense que si l'on faisait de telles expériences, répétées et puissantes, on ne manquerait pas de voir cette matière fulminante, sans parler de la foudre globulaire. Mais ces expériences ont été réalisées. La combinaison d'azote et d'oxygène a fait l'objet d'installations industrielles énormes : centaines de milliers de kW, milliards de kWh. Des centaines de chimistes ont suivi ces travaux ; des milliers d'essais ont été exécutés. Jamais on n'a vu se produire autre chose que les oxydes connus, surtout NO. Peut-on admettre que l'on ait obtenu cet étrange oxyde N^mO^n, dont parle M. MATHIAS sans le voir ? C'est peu croyable, on ne fabrique pas impunément de violents explosifs dans des expériences mettant en action des millions de tonnes de matières. Dans ces expériences, l'homme n'a-t-il pas dépassé la nature ? L'air a circulé en grandes masses dans des fours ramassés où l'on mettait tout en œuvre pour atteindre la plus haute température ; n'y a-t-il pas été chauffé davantage que dans un grêle éclair bien refroidi par sa forme même ?

Peut-on admettre ainsi qu'un gaz hypothétique contienne, à volume égal, une énergie chimique plus grande, libérable par sa décomposition, que tous les explosifs solides ? La mélinite et les corps analogues ne contiennent que 2 kWh:dm³. Le gaz, ayant 2 000 fois moins de masse spécifique, dégageait 4 fois plus d'énergie.

M. MATHIAS me fait observer que, dans sa communication du 8 novembre 1930, il a donné deux méthodes de calcul différentes de l'énergie contenue dans la matière fulminante. La première consiste à prendre, sans discussion ni examen critique, une quantité d'électricité admise dans un nuage par certain auteur donnant un nombre dépassant beaucoup celui qui est énoncé par d'autres, et de même pour la tension (par exemple, alors que PEEK admet un gradient disruptif de 330 kV:m, alors que d'autres ont diminué cette valeur, M. MATHIAS part de 800). Le nuage pris pour exemple, en le calculant comme un condensateur, aurait une surface de 4,5 km² ; contrairement à de nombreuses opinions, il admet que toute l'énergie de cet énorme nuage est employée intégralement à transformer la matière d'un seul éclair de

35 mm de diamètre, déchargeant instantanément le nuage entier. On accumule ainsi, sans analyse suffisante, suppositions sur hypothèses et, en les variant n'arriverait-on pas à toute valeur que l'on désirerait ?

Quant à la seconde méthode, basée sur une singulière observation faite le 14 septembre 1746, de corpuscules de matière fulminante auxquels on attribue, près de deux siècles plus tard, des dimensions, une température... il me semble qu'il suffit de la lire pour l'écarter.

Passons sur les points secondaires, comme cette étrange présence de quantités agissantes de soufre dans l'atmosphère, comme toutes les singularités physiques et chimiques de la matière fulminante que nous décrit notre collègue.

Je crois donc que, tout en reconnaissant à M. Mathias le mérite d'avoir cherché une explication de phénomènes peu saisissables, nous devons demander d'autres preuves avant d'admettre l'existence de cette matière fulminante (1).

RÉPONSE DE M. MATHIAS

1. — Si j'ai bien compris l'argumentation de M. Bunet, il identifie la théorie de *l'arc électrique* et celle de la foudre.

Or, ce sont deux phénomènes absolument différents et qui n'ont pas nécessairement de relations simples.

2. — J'ai appelé *matière fulminante* (pour ne pas être obligé de forger un mot grec nouveau pour la désigner) la substance qui constitue *l'éclair* et qui émet en quantité énorme des rayons ultra-violets qui la rendent aveuglante et qui prouvent tout au moins sa très haute température ; les anciens physiciens, comme le vicomte C. Mahon (lord Stanhope), l'appelaient indifféremment le *feu électrique* ou la *matière de l'éclair*.

Quand un éclair dure 1, 2, 3... secondes et quelquefois un peu plus, on voit, en dehors de toute illusion d'optique ou de persistance des impressions lumineuses sur la rétine, un *corps lumineux* ; quelquefois même on le voit tomber, soit de toute pièce (sa forme ne changeant pas) quelquefois pendant que sa forme et sa couleur se modifient.

Il s'agit donc bien d'un *corps lumineux*, distinct de l'air simplement très chaud qui — lui — n'est pas lumineux d'une façon appréciable.

3. — La composition de la *matière fulminante* m'est inconnue ;

(1) J'ai déjà donné une bonne partie de ces arguments et d'autres encore dans un article paru dans *L'Industrie Electrique* du 10 janvier 1931.

mais, dans mes raisonnements, je n'ai pas besoin de la connaître. Il suffit qu'elle demeure *la même dans tous les temps et dans tous les pays*, et que, dès lors, *toutes les observations complètes et bien faites soient toujours comparables*.

Personne ne sait ce que c'est que l'électricité; et cela n'empêche nullement la science de l'électricité d'être extrêmement avancée et de faire constamment des progrès.

4. — J'ai supposé, comme étant l'hypothèse la plus simple de toutes, que c'était un composé oxygéné de l'azote encore inconnu et prenant naissance vers 2 500° C ; *c'est simplement pour fixer les idées*.

On pourrait imaginer un complexe d'oxygène, d'azote et des gaz rares de l'air, par exemple. Cela ne me froisserait nullement. La chose essentielle est celle-ci : la *matière fulminante* est exclusivement formée des composants de l'air; c'est un corps fortement endothermique, donc *explosif* d'après Berthelot et qui, en faisant explosion, redonne à l'état de pureté les corps dont il est formé *sans composés intermédiaires*, donc en redonnant de l'air. Cela confirme que l'éclair ne laisse jamais de traces. Né de l'air, il redonne de l'air quand il se détruit par explosion.

M. Bunet dit, à propos de mon hypothèse simple — mais non nécessaire — relative à la composition de la matière fulminante :

« Un autre point *qui aurait besoin d'explication* est la composition de cet oxyde d'azote extraordinaire. *Je n'ai rencontré aucun chimiste qui pût admettre son existence*. Il est tellement différent, non seulement des autres oxydes d'azote, *mais de tous les corps qu'un chimiste ait pu jamais voir, ou soupçonner* que, avant de baser sur lui des théories valables, il faudrait avoir quelques bonnes raisons nouvelles. »

Je répondrai seulement que quand 2 corps, comme O et Az donnent un grand nombre de composés, au fur et à mesure que la température de formation s'élève, les corps deviennent plus explosifs, la chaleur de formation devenant de plus en plus grande en même temps que croissent la contraction et le poids moléculaire.

Si M. Bunet n'a jamais rencontré de chimiste admettant la possibilité de la matière fulminante, j'ai rencontré ce *rara avios* parmi un de nos plus grands savants, que je n'ai pas à nommer.

5. — La température de formation m'est inconue. J'ai admis pour fixer les idées 2 500° C. Une seule condition relève la température de formation et le poids moléculaire ; elle consiste en ce que *la matière fulminante tombe lentement dans l'air légèrement raréfié des orages* (à 100, 200, 300 m d'altitude). J'admets que la densité de la manière fulminante est égale à la densité 1 de l'air normal.

Si t est la température centigrade de formation de la matière fulminante, que je suppose être un air n fois condensé, on doit avoir :

$$d = \frac{n}{1+\alpha t} = 1, \qquad \alpha = \frac{1}{273},$$

$$n = 1 + \alpha t = 1 + \frac{t}{273}, \qquad t = (n-1)273^{\circ},$$

si

$$n = 10, \qquad t = 9 \times 273^{\circ} = 2\,457^{\circ}.$$

Voilà pourquoi, si j'admets une température de formation de 2 500° C environ, il faut un air 10 fois condensé.

Avec une température de formation de 3 000° C, il faudrait un poids moléculaire 12 fois plus grand que celui de l'air normal, cas :

$$12 = 1 + \frac{t}{273}, \qquad t = 11 \times 273^{\circ} = 3\,003^{\circ}\ \mathrm{C}.$$

— On est ainsi conduit, pour rendre compte des propriétés de la matière fulminante, à étudier les propriétés d'un gaz explosif, fortement endothermique, à poids moléculaire extrêmement élevé et donnant comme produits de décomposition l'oxygène et l'azote, gaz à très faible poids moléculaire. Il en résulte des propriétés remarquables que M. Bunet ne soupçonne pas et qui permettent de donner des réponses à des questions qui ne l'intéressent pas.

6. — Je n'ai jamais parlé de la possibilité de produire artificiellement des arcs chauffant l'air à 3 000°. Je n'en suis pas encore là.

De ce que les Américains n'ont jamais vu autre chose que les oxydes connus et surtout NO, ce n'est pas une raison pour dire que la synthèse de la matière fulminante est impossible. Du moment où la nature la réalise, l'homme peut la réaliser aussi.

7. — Les modes de calcul de l'énergie intérieure de la matière fulminante par centimètre cube ou par gramme, que j'ai employés, ont pour but de chercher *l'ordre de grandeur* de cette énergie *et non sa valeur absolue* ; c'est ce que M. Bunet n'a pas compris.

Dans la première méthode de calcul, j'admets des nombres moyens, intermédiaires entre les extrêmes, précisément pour obtenir l'ordre de grandeur cherché. Or, j'arrive au même ordre de grandeur de l'énergie par gramme que pour la nitroglycérine, aussi bien par la première méthode que par la seconde, qui est beaucoup plus sûre.

Pour ce qui est de la seconde méthode, M. Bunet emploie pour la combattre des arguments tout au moins imprévus :

1° Elle est *singulière* ; 2° *le phénomène utilisé a deux siècles d'existence ! 3° il suffit de la lire pour l'écarter* !

— Le phénomène utilisé, pour singulier qu'il paraisse à M. Bunet,

est net et facile à mettre en équation. Il met en œuvre des grandeurs peu nombreuses, absolument différentes de celles de la première méthode, elle est très curieuse à cause de cela.

De ce que le phénomène date de 2 siècles, cela n'a aucun inconvénient puisque la composition de l'air est toujours la même et qu'il doit toujours en être de même de la composition de la matière fulminante.

La question des dimensions linéaires (grosseur d'un pois, diamètre de l'extrémité du petit doigt) ne soulève pas de difficulté sérieuse.

Le seul doute tient à la température, que j'évalue aux environs de 1 000° centigrades.

Cette seconde méthode, que je trouve très supérieure à la première ne mérite pas le mépris que lui voue M. Bunet. Le fait qu'elle conduit au même ordre de l'énergie par gramme que pour la nitroglycérine est pour moi d'un grand prix.

— Je crois volontiers maintenant que l'on peut adopter pour l'énergie intérieure de la matière fulminante une valeur environ moitié de celle que j'ai donnée, énergie qui, par gramme, serait double de celle de la nitroglycérine et non 4 fois. On vérifie alors, de façon tout à fait satisfaisante, la proposition du professeur Galli, à savoir qu'une foudre *sphérique de 2 cm de rayon est déjà très dangereuse, tandis qu'une foudre de 2 mm de rayon est pratiquement inoffensive.*

— Si M. Bunet avait raison et qu'il faille diviser mes nombres non par 2 mais par 2 000, la proposition du professeur Galli serait fausse pour les foudres de 2 cm de rayon.

8. — M. Bunet n'admet pas l'impureté *soufre* pour la matière fulminante, ni le fait signalé longuement par Wilfrid de Fonvielle que ce corps se rencontre en quantité énorme dans les espaces cosmiques. J'ai signalé ce fait parce que cet auteur est arrivé d'une façon tout à fait indépendante à cette proposition curieuse qui complète et étaye celle que j'avais donnée en n'invoquant que l'absorption par la matière fulminante des poussières organoïdes et vivantes (graines, pollen, animalcules) que l'éclair rencontre sur son passage dans l'air.

RÉPONSE DE M. BUNET

J'ai pris connaissance de la réponse de M. Mathias. Je ne peux que maintenir ma manière de voir en laissant mes collègues tirer les conclusions que cette discussion comporte.

EMPLOI DE L'ULTRA-FILTRATION SOUS LE VIDE POUR L'ENTRETIEN DES HUILES ÉLECTRIQUES ET LES MISES A HUILE (1)

Discussion de la communication de M. D. Texier.

par M. Walch

Directeur de la Société Alfa-Laval.

a) *Cycle de colmatage du filtre* Helee Shaw.

b) *Insuffisance du pouvoir épurateur du séparateur centrifuge en matière d'huiles électriques.*

c) *Séchage à la sous-station des noyaux et enroulements des transformateurs par bain d'huile sèche à la pression atmosphérique.*

La plupart des méthodes d'épuration et séchage dont M. Texier vient de nous entretenir me paraissent très satisfaisantes pour l'esprit et étayées par une longue expérience industrielle.

Je désire donc réexaminer de plus près devant vous seulement trois points particuliers de l'exposé de M. Texier sur lesquels je ne me trouve pas d'accord avec lui :

I. Le cycle de colmatage du filtre Helee Shaw.

II. L'insuffisance du pouvoir épurateur du séparateur centrifuge en matières d'huiles électriques.

III. Le séchage à la sous-station des noyaux et enroulements des transformateurs par bain d'huile sèche à la pression atmosphérique.

I

Le filtre Helee Shaw peut extraire d'une huile les particules solides les plus fines qu'elle tient en suspension : c'est ce que vous a prouvé très nettement l'expérience faite de l'épuration des quelques cen-

(1) Communication présentée à la séance du 15 février 1932 de la 4e section de la Société Française des Electriciens et à la réunion mensuelle du 6 avril 1932 et publiée dans le *Bulletin de la Société française des Electriciens* de juillet 1932, p. 708.

taines de grammes d'huile charbonnée par un élément filtrant de 200 cm² environ.

Il serait intéressant que le conférencier nous indique si son filtre est capable de retenir également l'humidité libre que l'on trouve fréquemment émulsionnée dans l'huile des transformateurs et des disjoncteurs, ou, dans l'hypothèse contraire, qu'il nous marque le traitement de préférence pour éliminer avant filtration des pourcentages eau pouvant dépasser 1 pour cent dans la pratique.

Les particules solides abandonnées par l'huile polluée se répartissent sur le filtre d'après leurs dimensions transversales ; les plus grosses sur le bord extérieur des lamelles, entre lesquelles elles ne

Diagramme de travail d'un filtre à huile

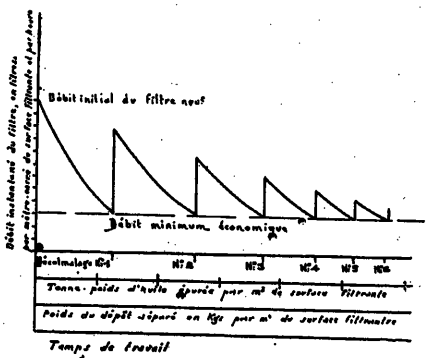


Fig 1.

peuvent pas pénétrer, les plus fines dans les canaux capillaires entre les rondelles voisines.

Lors de l'expérience faite devant vous, nous avons constaté que le courant d'air insufflé par le tuyau de décharge d'huile épurée détachait bien les premières particules, mais nous savons que les secondes ne sont pas éliminées par le courant d'air et qu'elles provoquent un colmatage progressif du filtre comme schématisé sur la figure n° 1.

D'autre part, M. Texier nous fait remarquer, à juste titre, que les huiles électriques et particulièrement les huiles d'interrupteur, contiennent en grande proportion ces particules très fines qui pénètrent entre les lamelles du filtre et le colmatent.

Pour apaiser les inquiétudes que nous avons d'une diminution rapide de débit et du remplacement fréquent des éléments, il serait nécessaire que M. Texier nous apporte quelques diagrammes de colmatage en service pratique, qui ont certainement dû être établis depuis la mise en service des premiers filtres Helee Shaw en 1925.

Si nous laissons donc de côté le traitement des huiles très charbonnées, des huiles fortement chargées d'humidité et, de plus, des huiles de transformateurs trop chargées de dépôt asphaltogène, pour lesquelles l'on ne nous a pas encore prouvé que l'emploi du filtre HELEE SHAW était possible et économique, nous sommes persuadés, comme M. TEXIER lui-même, que le filtre épure très à fond, à grand débit et avec des frais modérés de surveillance et de remplacement des éléments, les huiles électriques neuves et peu chargées.

L'usager seul peut faire la preuve que les contreindications d'emploi énumérés plus haut, ne rendent pas le travail plus onéreux que celui des épurateurs existants.

II

Insuffisance d'épuration des huiles électriques par le séparateur centrifuge.

Pour illustrer la valeur du filtre HELEE SHAW, M. TEXIER a comparé tout à l'heure son pouvoir épurateur à celui du séparateur rotatif industriel développant la plus grande force centrifuge.

Ses calculs concluent que cette machine, travaillant dans les meilleures conditions possibles, laisse en suspension dans l'huile des particules de 12 μ et ne peut satisfaire l'électricien à cause de l'hétérogénéité du produit qui en sort.

Nous ne pouvons donner notre accord à M. TEXIER sur ce point, parce que nous avons centrifugé depuis 10 ans de très nombreuses huiles isolantes dans les stations de transformation les plus variées en France et à l'étranger avec des séparateurs rotatifs ne développant pas toujours la force centrifuge maximum, dont il fait la base de ses calculs. Et cependant aucun des examens microscopiques des échantillons traités n'ont révélé la présence de particules supérieures à 6 μ de dimension transversale.

De plus, et c'est là le seul critérium qui importe en pratique, nous avons toujours pu obtenir, des huiles isolantes centrifugées suivant nos instructions, une rigidité diélectrique égale ou supérieure à celle que M. TEXIER donnait tout à l'heure pour critérium de l'épuration du filtre.

Nous ne croyons donc pas que l'on puisse opposer à ces résultats, obtenus journellement depuis 10 ans par de nombreuses sociétés distributrices, l'expérience de centrifugation d'huile isolante polluée artificiellement au noir végétal, que M. TEXIER impute à charge à ce

mode d'épuration. En effet, le produit d'addition qu'il emploie diffère par toutes ses caractéristiques et par son poids spécifique, en particulier, des suspensions charbonneuses ou asphaltiques qu'il faut éliminer de l'huile isolante usagée, et le résultat de la centrifugation de ces diverses huiles doit différer complètement.

Si M. Texier avait choisi, comme liquide de référence, une huile d'interrupteur usagée, les résultats qu'il aurait pu produire aujourd'hui possèderaient une meilleure valeur démonstrative. Il aurait, en effet, pu montrer l'insuffisance de la force centrifuge pour séparer à elle seule le carbone colloïdal qui la pollue et rappeler l'obligation où se trouvent les usagers des centrifuges de floculer préalablement ce carbone par une terre active convenablement choisie. Je ne pense

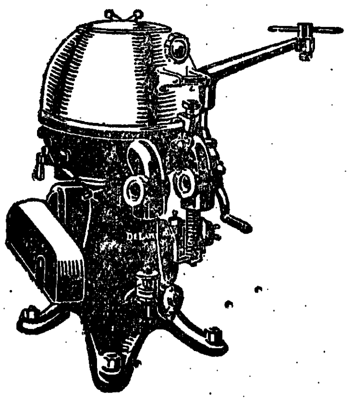


Fig. 2.

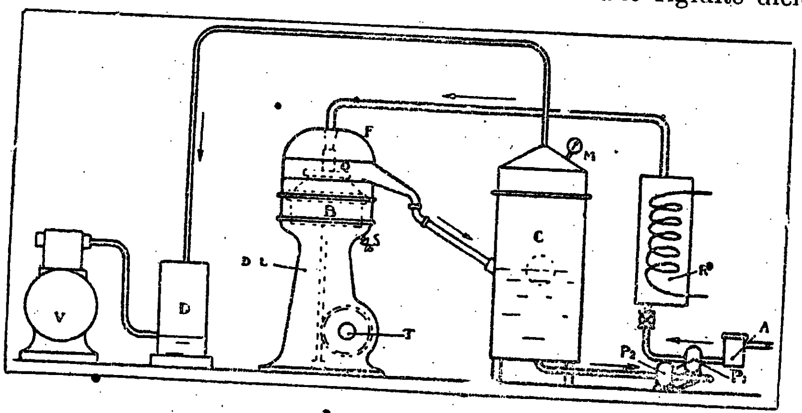
rien révéler de nouveau en vous disant que cette méthode de floculation est maintenant employée très généralement, qu'elle présente en outre l'avantage de neutraliser et d'éliminer en partie les acides organiques produits par la chaleur de l'arc dissous dans le sein de l'huile et indifférents à la filtration comme à la centrifugation seules.

Si l'action isolée du séparateur centrifuge semble, au premier examen, être inférieure au filtre Helee Shaw pour éliminer le carbone colloïdal de l'huile, ce premier système d'épuration reprend le pas lorsqu'il s'agit de séparer des quantités notables d'eau émulsionnées dans l'huile ou déposées au fond de la cuve du transformateur. Suivant le principe du vase florentin, connu depuis la renaissance, le centrifuge peut, en effet, séparer continuellement et laisser écouler séparément toute quantité d'eau suspendue initialement dans l'huile, sans que son pouvoir épurateur ou son débit en soient affectés.

Depuis quelques années, les constructeurs de centrifuges ont tiré partie de la pulvérisation de l'huile à la sortie des rotors de ces machines pour effectuer l'élimination complète de l'eau restée dissoute

à la température du traitement et à la pression atmosphérique

Ils ont simplement rendu hermétique l'enveloppe dans laquelle tourne le bol du centrifuge (voir fig. 2). Ils ont appliqué un vide élevé sur l'enceinte ainsi constituée (variant de 1/2 atmosphère pour certains constructeurs à 9/10 atmosphère pour les séparateurs DE LAVAL. Ils ont aménagé le rotor pour que la pulvérisation de l'huile et les surfaces d'évaporation soient maxima; et ils ont pleinement réussi à produire en continu, avec le seul centrifuge, une huile contenant moins de 1/100 000 d'eau en solution et offrant une rigidité diélec-



LÉGENDE

DL	Separateur Centrifuge ' De Laval autoclave	C	Réservoir autoclave à niveau constant.
B	Bol du Séparateur.	M	Manomètre
F	Récepteur étanche de l'huile épurée	R	Réchauffeur électrique à puissance réglable
O	Orifice d'échappement de l'huile du Bol B	V	Pompe à vide.
S	Vanne d'admission d'air atmosphérique	D	Condenseur
T	Presse-étoupe sur arbre à 600 t/m tournant dans des paliers fixes	P1-P2	Pompes
		A	Tamis

Fig. 3. — Schéma du séparateur centrifuge De Laval cuiseur sous vide.

trique de l'ordre de 100 000 V entre sphère de 12,5 millimètres, distance horizontale de 5 millimètres.

Cette machine, accompagnée de la pompe à vide, du réchauffeur et des pompes de circulation, a pris le nom de « centrifuge cuiseur sous vide » et son emploi est recommandé pour les mises à huiles des transformateurs (voir, fig. 3, le schéma de montage de cet appareil).

Nous reconnaissons volontiers que ces cuiseurs centrifuges, travaillant à une pression absolue de l'ordre de 70 millimètres de mercure, déshydratent et dégazent moins complètement les huiles que les cuiseurs basés sur d'autres principes et travaillant à 1 millimètre de pression absolue.

Mais vous avez vu plus haut que les quantités d'eau restant dissoutes dans l'huile et sur lesquelles porte la différence des pouvoirs asséchants des deux machines sont extrêmement petites.

III

Séchage à la station des noyaux et enroulements des transformateurs par bain d'huile sèche à la pression atmosphérique.

Nous partageons les vues de M. Texier sur la nécessité d'utiliser le bain d'huile pour sécher à la station les guipages, noyaux et cuves des transformateurs, et nous pensons que la méthode préconisée par lui donne de bons résultats avec des transformateurs qui ont été séchés à cœur chez le constructeur et qui n'ont repris que de l'humidité superficielle pendant le transport.

Par contre, lorsqu'il s'agit de sécher des appareils longtemps entreposés sans huile dans un magasin humide, ou bien dont les guipa-

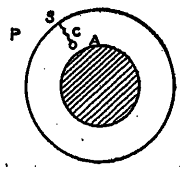


Fig. 4.

ges ont été réparés sur place, nous craignons que le bain d'huile anhydre à 80° C et sans vide, n'effectue un séchage certain à cœur qu'au prix d'une prolongation inacceptable de la durée du travail.

Dans ce cas, qu'il est fréquent de rencontrer à la station, nous préférons placer l'ensemble du transformateur ou au moins les circuits électriques et magnétiques dans une enceinte à une pression absolue aussi basse que possible (inférieure à 100 millimètres de mercure), asperger les éléments par de l'huile à 80°C et desséchée, et élever lentement le niveau de l'huile dans la cuve jusqu'à immerger le circuit magnétique complet. Dans ce mode de travail, le cuiseur isobare, ou le centrifuge cuiseur servent à prélever continuellement et à gros débit l'huile humide au bas de la cuve de service, à la dessécher profondément et à la renvoyer aux rampes d'aspersion pour reprendre son circuit.

Les raisons qui nous font préférer la méthode de séchage sous vide ou traitement sans vide, préconisé par M. Texier sont les suivantes :

Représentons en *a* (fig. 4) une bulle d'eau occluse dans un guipage d'enroulement à une certaine distance de la surface libre S. Schématisons par le canal capillaire C les chemins très tortueux qui s'of-

frent à cette bulle d'eau pour gagner la surface S. A la température de 80° C où l'on a porté l'ensemble du transformateur et la bulle d'eau *a* en particulier, son évacuation peut être obtenue suivant deux modes de cheminement tout à fait différents :

a) La pression absolue sur la surface S est inférieure à la pression de vapeur de l'eau à 80° C, soit 482 g.

La bulle *a* se vaporise instantanément et elle s'évacue d'autant plus rapidement par le canal C que la différence est plus grande entre la pression de vapeur de l'eau à 80°C et la pression *p*. Donc, plus l'opérateur abaisse *p*, plus la circulation de la vapeur dans les canaux analogues à C sera rapide et plus rapide aussi le séchage à cœur des circuits magnétiques et électriques. C'est un peu au-dessous de la surface libre de l'huile que l'effet de séchage est maximum, parce que la température des éléments à sécher, *g*, est uniforme et la pression absolue sur la surface S la plus voisine de la pression donnée par la pompe à vide. C'est cette remarque qui nous conduit à faire le séchage des transformateurs de plus de 1,50 m de hauteur de noyau par élévation lente et progressive du niveau d'huile ; faute de cette précaution, la partie basse du transformateur peut être moins bien séchée que la partie haute.

b) La pression absolue sur la surface S est supérieure à la pression de vapeur de l'eau à 80°C et cette surface est baignée par de l'huile sèche.

Le phénomène de passage de la bulle d'eau de *a* à S, n'est plus une expansion libre de vapeur dans un canal capillaire sous une pression motrice de quelques centaines de grammes par centimètre carré.

L'huile sèche qui baigne S absorbe, par dissolution, l'eau qu'elle trouve sur cette surface ou dans l'isolant immédiatement à son contact ; mais cette dissolution relativement lente est limitée à la saturation de l'huile, soit environ à la proportion 1/1000 d'eau dans l'huile. La couche périphérique de l'isolant, étant sèche, absorbe l'humidité occluse dans la couche voisine et le phénomène se répète de proche en proche à l'intérieur de l'isolant, jusqu'à intéresser la bulle *a*, l'huile absorbant et évacuant continuellement l'eau qui traverse la surface S.

Il est clair que l'action desséchante de l'huile sur la masse de l'isolant sera d'autant plus longue et incomplète que les éléments isolants concentriques et en particulier la surface S, seront mieux imprégnés et moins hygroscopiques.

La méthode de séchage sous vide avec évacuation continue de l'humidité par circulation de l'huile entre la cuve de séchage et le centrifuge cuiseur sous vide a fait ses preuves dans de nombreux postes et ateliers.

Voici quels ont été les résultats atteints, il y a deux ans déjà, dans les ateliers Brown-Boveri et C° à Manheim.

1 transformateur neuf de 200 kVA, contenant 2 T d'huile a été séché en 30 h.

Le contrôle régulier de l'eau condensée (au total 8 l) a permis de suivre le séchage et de l'arrêter sans cause possible d'erreur au moment où il était achevé. L'essai de surtension à 30 000 V a été concluant.

REPONSE DE M. D. TEXIER

a) Tout d'abord, je dois faire observer que ma communication n'a pas pour objet une critique générale des centrifuges. J'ai seulement voulu faire connaître un appareil qui me semble convenir plus particulièrement au problème qui nous intéresse ici : le traitement des huiles électriques.

Ce problème est caractérisé par les quantités extrêmement faibles d'impuretés à capter et leurs dimensions très petites.

La plage pratique d'utilisation de l'huile est, sur la courbe de sa qualité, au voisinage de l'asymptote. Le degré de perfection du procédé a donc une influence considérable sur la qualité.

A ces doses très faibles, les impuretés n'agissent pas seulement par leur masse propre, mais par leurs influences réciproques. L'effet de l'humidité sur l'acidité, est tout à fait typique à cet égard.

L'emploi du centrifuge est certainement incomparable quand on l'utilise pour l'élimination des impuretés relativement massives et en quantités importantes. Mais ce n'est pas le cas du problème spécial des huiles électriques.

b) M. Walch nous signale les colmatages assez rapides qu'il a observés avec un filtre Heele-Shaw. Nous ne connaissons pas l'appareil qui a servi à ses essais ; il doit certainement différer du nôtre, soit dans son principe, soit dans sa réalisation.

Notre *Ultra-Filtre* est à éléments lamellaires imperméables. Nous avons choisi parmi les divers éléments filtrants de ce type, ceux de la Compagnie Stream Line Filter dont une longue expérimentation nous avait montré la supériorité.

Leur aménagement dans l'*Ultra-Filtre*, qui est d'une importance capitale, a été réalisé en notre Laboratoire après des essais qui ont duré deux années.

D'ailleurs, l'*Ultra-Filtre* proprement dit, n'est qu'un élément du *Vacuum Ultra-Filtre*. Il ne faut pas disjoindre dans la critique, le dégazéificateur qui le complète et dont le rôle est primordial. Cet appareil résulte d'une expérience continue de plus de dix années. Son efficacité est voisine de la perfection.

c) En ce qui concerne le cycle du colmatage, je dois dire que la répartition des impuretés ne se fait pas dans notre appareil comme dans celui expérimenté par M. Walch.

Aux premiers instants du fonctionnement, les particules plus petites que l'intervalle entre les rondelles fortement pressées l'une contre l'autre, peuvent, en effet, pénétrer entre ces rondelles. Etant donné le serrage, cette pénétration est très peu profonde. Vous pouvez voir, par exemple, sur des rondelles ayant un an d'usage, qu'elles ne dépassent guère 1 mm.

Cette pénétration n'est d'ailleurs possible que pendant un temps très court, par suite de la création immédiate d'un préfiltre sur la frange du filtre. C'est ce préfiltre que l'on voit se détacher comme une peau d'anguille aux premiers instants de nettoyage du filtre.

Ce nettoyage, qui s'effectue avec l'huile propre restant dans le canal central des éléments filtrants, agit non seulement sur le préfiltre, mais chasse aussi les impuretés introduites dans les intervalles des rondelles.

Nous avons fait au laboratoire de nombreuses expériences sur le colmatage. Il en ressort que, pour les huiles de transformateurs *souillées*, l'effet de colmatage ne se fait sentir qu'après 8 000 h.

Pour les huiles de disjoncteurs *souillées*, cet effet n'est sensible qu'après 4 000 h.

Il semble, d'ailleurs, qu'on ne puisse pas atteindre le colmatage complet ; le débit limite étant, dans tous les cas, supérieur au 1/4 du débit initial.

Par suite de la nouveauté relative de cet appareil, nous n'avons pas pu recueillir d'informations pratiques pour des durées plus longues.

Les chiffres relevés semblent cependant confirmer les expériences du laboratoire. En particulier, une importante Société, qui utilise un de nos appareils uniquement pour les huiles de disjoncteurs, nous confirme qu'après 1 500 h d'usage, le débit horaire de l'appareil est demeuré identiquement le même.

d) Le coût de l'opération est des plus faibles : y compris le chauffage de l'huile et la force motrice nécessaire à la manutention de cette

huile entre notre appareil et le transformateur, la dépense ressort à 0,02 f par litre d'huile purifiée (sur la base du KWh à 0,50 f.

Etant donnée la durée considérable des éléments filtrants et leur coût relativement peu élevé, ils n'influent pratiquement pas sur le prix de revient.

Leur remplacement est d'ailleurs une opération facile, pas plus longue que le nettoyage des assiettes d'un centrifuge, ou le changement d'un bloc de buvards de filtre-presse, et beaucoup plus propre que ces deux opérations.

e) Dans l'expérience que nous avons faite devant la quatrième Commission de la S. F. E., nous avons procédé sur une huile artificiellement souillée, uniquement dans le but de pouvoir définir le dosage de ses impuretés, ce qui n'eût pas été possible avec une huile usagée industrielle.

La difficulté du traitement n'en a pas été diminuée, bien au contraire, attendu que certaines de ces impuretés, comme le noir de fumée, sont particulièrement difficiles à filtrer.

L'expérience sur une huile usagée conduit à la même perfection du résultat.

Nous avons donné, à cet égard, un procès-verbal du Laboratoire Central d'Electricité dont les résultats dispensent de tout commentaire.

f) Pour la pratique du traitement des huiles électriques, nous n'avons en général pas besoin d'avoir recours à la floculation pour séparer les impuretés.

Notre appareil se prête d'ailleurs très bien à cette manipulation. Il permet alors, comme l'a signalé M. WALCH, de réaliser, par exemple, des traitements de neutralisation de l'huile.

Si la floculation ou l'emploi de terre absorbante ne présente aucun inconvénient avec notre appareil, il n'en est pas de même, selon nous, avec les centrifuges lorsqu'il s'agit, entendons-nous bien, du traitement des huiles électriques.

L'efficacité du centrifuge se trouve évidemment augmentée par le fait que le traitement a pour résultat de grossir énormément les particules ; mais la substance auxiliaire introduite dans l'huile constitue une impureté nouvelle. De fines particules de cette nouvelle impureté échappent à l'action centrifuge pour les raisons que nous avons exposées longuement précédemment.

En somme, on a changé d'impuretés.

g) L'adjonction récente aux appareils centrifuges d'un dispositif travaillant sous le vide, montre que les spécialistes de la centrifugation se sont rendu compte de l'efficacité insuffisante de leurs appareils.

Nous pensons toutefois que cette combinaison des 2 méthodes ne peut pas réaliser les conditions optima. L'huile, en effet, dans ces dispositifs, est réchauffée en amont du centrifuge. Or, tous ceux qui ont travaillé la question de la vaporisation de l'eau dans l'huile, savent combien elle est difficile à réaliser. Il est nécessaire, pour obtenir un résultat convenable, de disposer, aux zônes d'évaporation, de températures avoisinant 80° C.

Les centrifugeurs sont donc obligés, s'ils veulent une déshydratation convenable, d'introduire dans leur bol une huile à une température supérieure à 80° C. Nous craignons que, dans ces conditions, l'huile plus ou moins aérée, ne souffre sous cette température du brassage très énergique de ses particules. Si l'on voulait éviter cet inconvénient, il ne faudrait pas dépasser une température de 60° C de l'huile introduite dans le bol, mais le cuiseur sous le vide qui fait suite au bol, devrait avoir des dimensions importantes et travailler sous un vide très profond qui serait sans doute irréalisable dans le centrifuge.

L'effet de la pulvérisation, ou plus exactement du choc mécanique des particules d'huile sortant du bol centrifuge et accédant dans le cuiseur est, évidemment, une condition favorable à la bonne dégazéification, mais elle n'est pas la seule. Il ne suffit pas de diviser le liquide à dégazéifier, il faut aussi le soumettre un temps suffisamment long à la dépression du vide. Le temps de séjour du liquide dans le dégazéificateur joue, suivant nos expériences, un rôle primordial.

La pulvérisation a en outre l'inconvénient de provoquer vers la pompe à vide, des aspirations permanentes d'huile finement divisée. C'est pourquoi nous voyons sur l'image que nous présente M. WALCH, un récipient intermédiaire important, vraisemblablement destiné à capter ces vésicules.

h) M. WALCH a préconisé une méthode d'utilisation du cuiseur centrifuge pour réaliser la mise à huile d'un transformateur. Cette méthode consiste à asperger le transformateur avec l'huile purifiée du cuiseur centrifuge cette huile étant ensuite extraite à la base du transformateur par le centrifuge lui-même, de telle sorte que le transformateur ne soit que progressivement immergé.

Nous supposons que, dans ce procédé, une réserve auxiliaire d'huile purifiée est mise en œuvre pour fournir au bol l'appoint d'huile qui

servira à élever le niveau dans le transformateur de manière à réaliser, en fin d'opération, l'immersion totale.

Cette méthode pourrait parfaitement être employée avec notre appareillage qui s'y prête très bien, mais nous pensons qu'elle est défectueuse.

L'aspersion du transformateur avec l'huile chaude et anhydre a pour effet de mouiller la surface du transformateur, non encore immergé. L'huile pénètre dans les interstices, et, par capillarité, dans les isolants ; il est bien évident que cette pénétration ne peut pas être intime ni profonde.

D'autre part, la température à la surface du transformateur ne tarde pas à avoisiner celle de l'huile qui l'arrose. L'échange thermique entre cette huile et le transformateur devient alors à peu près nul.

L'huile, refroidie plus ou moins par ce contact avec la surface supérieure, tombe à la base du transformateur. Il en résulte que cette partie inférieure du transformateur est plongée dans une huile hydratée et à faible température, qui risque donc de fort mal sécher la base du transformateur.

Nous ne sommes pas d'accord non plus avec M. Walch sur l'explication du processus évaporatoire dans un tel dispositif. M. Walch présuppose que la bulle d'eau A est, à la température de 80° C. C'est une hypothèse toute gratuite. Pour que cette température soit réalisée, il faudrait que les calories amenées par l'huile à la surface du transformateur aient pu se propager jusqu'au point A. Or, nous savons que le temps de propagation dans un tel milieu, coupé d'isolants calorifiques, est très long ; d'autant plus que la surface du transformateur, comme nous l'avons dit plus haut, cesse rapidement d'absorber les calories de l'huile. La tension de vapeur dans la cavité A se rapportera donc à une température certainement très inférieure à 80° C.

En outre, l'évaporation dans cette cavité ne sera pas régie comme le dit M. Walch, par la différence $(P - p.)$

où P est la tension de vapeur à T en A,

et p la pression absolue dans le transformateur.

Ce qui conditionne l'évaporation, c'est la différence $P - p_1$:

où P tension de la vapeur d'eau dans la cavité A à la température T

et p_1 pression partielle de la vapeur déjà répandue dans cette cavité.

Nous avons démontré dans une récente communication que cette pression partielle p_1 pouvait être beaucoup plus élevée que la pression p dans l'autoclave.

En d'autres termes, pour réaliser l'évaporation au point A, il ne suffit pas de disposer d'une faible pression absolue dans le transforma-

teur, mais il faut véhiculer au point A les calories nécessaires au travail de vaporisation. Cette condition étant supposée remplie, l'évaporation se fera au point A, en fonction de (P — p_1) ou $p_1 > p$.

Envisageant notre dispositif, M. Walch signale que la pression absolue sur la surface S étant supérieure à la pression de la vapeur d'eau à 80° C, il n'y a plus évaporation.

Je fais remarquer, à nouveau, que la pression absolue sur la surface S, n'a aucune influence sur l'évaporation. C'est uniquement la pression partielle p_1 de la vapeur déjà dégagée qu'il faut considérer et non pas la pression des autres gaz, m la pression statique du liquide qui peut surplomber le point A.

En fait, lorsque les bobinages sont immergés, les phénomènes évoluent comme suit :

Dans la cavité où se trouve la bulle d'eau A, la vaporisation se produit si l'on a :

$$P > p_1.$$

L'influence de la charge statique du liquide agit ici pour retarder le cheminement de la bulle gazeuse saturée de vapeur d'eau vers la surface libre du liquide.

De ce point de vue, il y aurait évidemment intérêt à immerger le transformateur par le bas. Mais nous venons de démontrer que, dans cette disposition, la transmission de chaleur au sein des masses, se fait très mal et que la base du transformateur baigne dans une huile hydratée.

Dans notre dispositif, la transmission de chaleur se fait bien plus facilement au sein des masses par l'effet de l'immersion. La charge statique régnant au-dessus du point A devient favorable, puisqu'elle s'ajoute à la capillarité pour introduire le liquide chaud vers les centres de vaporisation.

Le dégagement de l'humidité s'opère de la manière suivante :

Vaporisation dans les cavités internes, où la chaleur latente de vaporisation a pu être propagée ;

puis cheminement des bulles gazeuses saturées, vers la surface libre (ébullition) ;

absorption de l'humidité par l'huile pénétrant dans les masses.

Cette humidité étant entraînée par le mouvement artificiel rapide.

Cette captation de l'humidité par dissolution est loin d'être négligeable aux températures considérées. D'autant plus que par le fait de l'immersion et de la circulation, le contact de l'huile avec les masses à sécher est très intime.

On peut admettre une dissolution d'environ 1/1000^e^ d'eau en poids. Autrement dit, un appareil débitant 1 000 l à l'heure sera capable de capter environ 1 l d'eau. Cette déshydratation, ajoutée au dégagement naturel par vaporisation et ébullition, explique le résultat parfait obtenu dans l'exemple important que je signalais tout à l'heure.

i) Contrairement à ce que pensait M. Walch, nous ne sommes pas partisans de l'emploi généralisé de l'huile pour le séchage complet du transformateur. Nous disons simplement ceci :

— Notre appareil débitant une huile parfaitement pure et anhydre permet de *réaliser les mises à huile.*

Les temps de traitement dans ces conditions sont tout à fait raisonnables pour les appareils de petite et moyenne puissance.

Pour les gros appareils, nous pensons qu'il vaut mieux ne pas demander tout le travail à l'huile. Nous préconisons de procéder d'abord à un pré-séchage des colonnes et des masses magnétiques par l'air chaud. Ce pré-chauffage par l'air n'exige pour ainsi dire pas de surveillance, si l'aérotherme est bien conçu, et si le transformateur possède des orifices *ad hoc* (ou bien si l'on procède dans une étuve convenable).

On immergera alors les colonnes et les circuits magnétiques dans leurs cuves avec l'huile purifiée débitée par notre appareil. Puis on procédera à l'ultime séchage, par une circulation continue, entre le transformateur et notre appareil.

Les calories déjà emmagasinées dans les masses permettront la vaporisation facile.

Au phénomène de dissolution de l'eau dans l'huile, s'ajoutera le phénomène très important de la condensation de la vapeur dégagée sur l'huile plus froide des cavités internes.

Enfin, nous faisons observer qu'il est précieux de posséder à la sous-station, un appareil qui, *normalement prévu pour l'entretien de l'huile, peut, éventuellement, servir aussi à toute mise à huile nouvelle après réparation.*

Si l'on ne possède pas d'appareil de séchage à l'air chaud, on pourra même utiliser notre dispositif pour la mise à huile de grands transformateurs, mais on aura naturellement la sujétion d'une conduite plus surveillée et d'une opération assez longue.

j) L'emploi du vide dans le transformateur pour réaliser la mise à huile serait extrêmement intéressant s'il était possible de fabriquer les calories dans les masses mêmes à sécher.

La méthode de la mise en court-circuit du secondaire permettrait d'obtenir ce résultat, mais les constructeurs et les usagers n'en sont guère partisans.

Hormis ce cas, nous ne voyons pas l'utilité de prévoir une cuve autoclave. Si la dépression favorise le dégagement de l'humidité superficielle, cette dépression n'a qu'une très faible influence sur la vaporisation des cavités internes.

En outre, il faut tenir compte du prix considérable de ces cuves autoclaves. Nous avons eu, par exemple, à nous occuper d'une installation qui comportait 3 transformateurs de 30 000 KVA. Ils avaient été initialement prévus pour être autoclaves, ce qui représentait un supplément de prix de 126 000 f. par rapport à des cuves ordinaires.

Cette dépense supplémentaire aurait été tout à fait justifiée si elle eût permis d'obtenir un meilleur résultat, mais nous avons vu qu'il n'en est rien.

TRAVAUX DES SECTIONS

EXTRAITS DES PROCÈS-VERBAUX

2e SECTION. — ÉCLAIRAGE ET CHAUFFAGE RADIATIONS DIVERSES.

Présidence de M. R. Jouaust

Séance du 13 avril 1932. — M. Marsat expose une *méthode de vérification des réflecteurs paraboliques pour autos* dont le résumé est donné ci-après.

La méthode que M. Marsat emploie depuis cinq ans environ, présente quelque analogie avec les méthodes décrites dans la note de MM. Waguet, Stampa et Dourgnon présentée à l'Académie des Sciences, le 15 juin 1931.

Elle est fondée sur les propriétés géométriques suivantes :

1° Toute droite passant par le foyer se réfléchit sur le paraboloïde suivant une droite parallèle à l'axe.

2° Toute section du paraboloïde par un plan oblique par rapport à l'axe est une ellipse.

3° Tout cylindre ayant pour section une ellipse donne une section circulaire lorsqu'il est coupé par un plan oblique convenablement orienté.

La vérification s'exécute à l'aide d'une lampe d'au moins une centaine de bougies placée à 20 ou 30 m d'un cache métallique ou en carton comportant une fente circulaire de faible largeur, un millimètre au plus, un châssis photographique chargé d'une plaque ou d'une feuille de papier au gélatino-bromure.

Pour déterminer la position à donner au cache et le rayon de la fente, le mieux est de choisir d'abord le plan dans lequel la lumière doit être réfléchie ; pour les phares d'automobiles on choisira un plan passant évidemment par le foyer et tangent au trou central destiné au passage du porte-lampe. Le châssis sera placé de façon à être perpendiculaire au plan choisi et parallèle à la droite qui joint les deux

points du réflecteur situés, l'un sur le bord du réflecteur et l'autre sur le plan diamétral normal au plan de coupe.

Si le réflecteur est parfait, on obtient sur la préparation photographique une ligne droite ; toute aberration se traduit par une sinuosité. On peut, en substituant au châssis photographique un verre dépoli et explorant avec une tige mince la surface du miroir, déterminer très vite les régions défectueuses. Il suffit d'ailleurs que le réflecteur en laiton soit avivé, il n'est pas nécessaire qu'il soit argenté.

On décèle les défauts et leur étendue mais il serait difficile de calculer leur valeur. Comme dans les autres méthodes, on déterminerait la valeur angulaire de l'aberration et non l'épaisseur du métal qui est en trop ou au contraire qui est en moins.

Pour répondre à une question de M. Bossu demandant s'il est facile de déterminer les défauts de l'outil à emboutir, il faut signaler que le piston n'a jamais exactement la forme du réflecteur qui, après la sortie de la presse d'emboutissage, perd les tensions positives ou négatives qu'il a pendant le travail.

Séance du 11 mai 1932. — *Recherches sur le centre photométrique de diffuseurs*, par M. Wetzel.

M. Wetzel rend compte de certaines recherches effectuées par la Commission de la Précision en photométrie de l'Association des Ingénieurs de l'Eclairage concernant plus particulièrement la photométrie des diffuseurs. L'intensité lumineuse étant définie pour une source ponctuelle, on peut se demander quel est l'ordre de grandeur de l'erreur que l'on commet en photométrant les sources telles que les diffuseurs qui ont des dimensions plus ou moins considérables. On peut traiter le problème par le calcul, c'est ce que fait rapidement M. Wetzel en établissant une formule générale permettant de fixer la position du centre photométrique d'un diffuseur relativement au point de l'espace où l'on mesure l'éclairement. Ce centre photométrique est défini comme le point où l'on pourrait placer une source lumineuse ponctuelle ayant la même intensité que le diffuseur dans la direction considérée (intensité mesurée à l'infini) et donnant le même éclairement au point considéré. On peut déduire, de cette formule générale, la position du centre photométrique des sphères et des disques plats.

En partant de ces considérations théoriques, M. Wetzel montre que le centre photométrique des diffuseurs se trouve toujours au voisinage du centre de symétrie de leur surface apparente. C'est donc en ce der-

nier point qu'il faudrait placer la lampe de comparaison lorsque l'on mesure l'intensité des diffuseurs.

Ces résultats théoriques coïncident avec les résultats des mesures photométriques effectuées par M. Tarnay, ingénieur à la Compagnie des Lampes, sur des diffuseurs de différentes formes.

M. Jouaust remercie M. Wetzel d'avoir présenté à la 2e Section les travaux de la Commission de l'Association des Ingénieurs de l'Eclairage et il félicite cette Association de s'occuper de ces questions qui doivent intéresser tous ceux qui ont à employer des appareils d'éclairage. Il signale que si la photométrie des diffuseurs présente relativement peu de difficultés, celle des réflecteurs est au contraire beaucoup plus complexe.

M. Wetzel indique que la Commission a l'intention d'examiner également cette question par la suite.

M. Jouaust signale que certains appareils ont des courbes photométriques présentant des pointes dans des angles très petits qui ne peuvent être décelées que par des mesures très rapprochées. Il est, dans ces conditions, difficile de calculer le flux.

4e SECTION. — CANALISATIONS. — APPAREILLAGE. DISTRIBUTION GÉNÉRALE. — TRACTION

Présidence de M. Cardon

Séance du 5 avril 1932. — M. Guery fait une communication « *sur les amorçages d'arcs sur les lignes aériennes, leurs causes, leurs effets. Essais d'arcs sur conducteurs tendus* », dont le résumé est donné ci-après.

M. Guery rappelle d'abord à la suite de quelles considérations ont été fixées les tensions d'essai des réseaux aériens. Il signale la relation qui existe entre ces tensions d'essais et les tensions de contournement des isolateurs de lignes.

Quelque grande d'ailleurs que soit la tension d'essai adoptée, certaines circonstances, atmosphériques ou autres, abaisseront toujours suffisamment la tension de contournement des isolateurs pour rendre possible des amorçages d'arcs en ligne.

Parmi les procédés employés pour lutter contre les effets de ces amorçages d'arc, on peut retenir l'emploi de relais sélectifs coupant rapidement la ligne accidentée.

Il est intéressant, pour fixer le temps limite d'action de ces relais, de connaître exactement les effets d'un arc amorcé sur un conducteur de ligne entre ce conducteur et la terre.

L'intensité du courant qui peut traverser un tel arc est définie, dans le cas où le point est isolé, par la capacité du réseau relié. Cette capacité est souvent assez grande pour qu'un arc de plus de cent ampères soit possible.

Quand le point neutre est mis à la terre, l'intensité du courant dans l'arc dépend des propriétés des transformateurs employés. Elle est en général encore plus considérable que dans le cas où le point neutre est isolé.

Il est donc intéressant de faire porter les essais sur des arcs d'au moins une centaine d'ampères amorcés sur des conducteurs tendus.

M. Guery montre par quelques considérations théoriques d'un caractère provisoire, en raison de l'incertitude de certaines données, qu'un essai à basse tension doit donner tout au moins une idée de l'ordre de grandeur des phénomènes.

Des essais de ce genre ont été effectués au mois de janvier 1932 sous les auspices de la Société Electrique de la Sidérurgie Lorraine à l'Usine d'Auboué de la Société des Fonderies de Pont-à-Mousson, dont cette Société a mis les ressources à la disposition des opérateurs.

Les résultats ont été les suivants :

Sous un arc d'une intensité de 140 A, un câble de cuivre de 50 mm² de section, tendu à raison de 13 kg par mm², s'est rompu en un peu plus de deux secondes et demie. Sous la même tension mécanique et la même intensité, il a fallu près de dix secondes pour rompre un câble de cuivre de 75 mm².

Sous la même tension mécanique et pour une intensité dans l'arc de 70 A, le câble de cuivre de 50 mm² s'est rompu en moins de 9 s, le câble de 75 mm² en près de 15 s.

En réduisant la traction sur le conducteur, on augmente notablement le temps nécessaire à la rupture pour une intensité déterminée dans l'arc.

Enfin, lorsqu'on examine le câble rompu, on trouve un certain nombre de brins fondus et agglomérés par l'arc. Les autres ont subi une striction beaucoup plus marquée que celle que l'on constate dans la rupture à froid.

Il est aisé, en comptant ces brins, de calculer sous quelle tension ils se sont rompus. On trouve ainsi des chiffres qui, dans certains cas, s'abaissent aux environs de 15 kg par mm² et qui semblent en tous cas

ne jamais dépasser 25 kg par mm². Le recuit et le ramollissement du cuivre sous l'action de la chaleur développée par l'arc sont donc manifestes.

Comme conclusion, et sous cette réserve que ces essais ne sont pas assez complets pour qu'on puisse en déduire des lois rigoureuses, M. GUERY fait remarquer que les résultats obtenus confirment néanmoins, par quelques indications précises, la nécessité d'écarter autant que possible toutes causes d'amorçages d'arcs sur les lignes à haute tension de certains réseaux très étendus où les arcs d'une centaine d'ampères sont toujours possibles et, dans tous les cas, de réduire la durée de ces amorçages à un temps très court. Les systèmes de protection qui demandent plus d'une seconde pour couper le courant devraient être écartés.

En faisant connaître les résultats de ses essais, M. GUERY souhaite tout d'abord de provoquer la publication d'autres résultats analogues, s'il en existe. Dans cet ordre d'idées, il semble en effet qu'on trouve seulement un article de M. DUSAUGEY dans la Revue Générale de l'Electricité du 7 juillet 1928, sous le titre : « Rupture accidentelle des conducteurs aériens. — Comparaison des conducteurs de cuivre et d'aluminium ». Mais, comme le titre même de l'article l'indique, l'auteur ayant seulement en vue une comparaison, a effectué ses essais au chalumeau, et ne les a pas fait porter sur des conducteurs subissant une traction mécanique, comme ceux des lignes aériennes.

M. GUERY souhaite enfin que les essais d'arcs sur conducteurs tendus soient repris par divers expérimentateurs dans de meilleures conditions de rigueur scientifique et en variant davantage les conditions d'expériences : nature et dimensions des conducteurs et des électrodes auxiliaires, traction mécanique, intensité, différence de potentiel, etc... Il est toujours intéressant de bien connaître les causes d'un mal, en remontant autant que possible aux phénomènes physiques élémentaires qui sont à son origine.

M. VALENSI souhaitant que les essais soient repris sur des conducteurs de métaux autres que le cuivre, fait également remarquer que les conditions dans lesquelles les conducteurs sont placés sur les lignes aériennes sont moins défavorables que celles des essais, l'arc n'étant pas, en particulier, continuellement maintenu en un point rigoureusement fixe.

M. GUERY donne son accord complet à M. VALENSI sur ce point et confirme que les essais donnent une limite supérieure des effets des arcs.

M. BUNET fait observer que les arcs entre conducteurs se déplacent,

non seulement par l'effet du vent mais aussi par suite de l'action électromagnétique.

M. GUERY répond qu'il a eu surtout en vue les arcs entre conducteurs et terre qui, eux, se trouvent fixés au voisinage des pylônes. N'ayant pas eu personnellement l'occasion d'observer des arcs en ligne, il rapporte des faits qui lui ont été signalés par des observateurs dignes de foi. L'un est relatif à un arc entre conducteurs se déplaçant rapidement le long de la ligne, l'autre au contraire à un arc entre conducteur et ferrure qui a pu se maintenir plusieurs minutes pour couper finalement le conducteur.

M. DARRIEUS signale l'instabilité habituelle de l'arc entre conducteurs.

A ce sujet, M. GUERY rappelle que dans les conditions de ses essais, il n'a pu obtenir un arc stable qu'entre électrode de charbon et cuivre. Entre deux conducteurs de cuivre, l'arc s'éteignait de lui-même immédiatement. (1).

6e SECTION. — RECHERCHES PHYSIQUES. — PHYSIOLOGIE APPAREILS DE MESURES

Présidence de M. BUNET

SÉANCE DU 25 AVRIL 1932. — M. VASSILLIÈRE-ARLHAC fait l'analyse suivante d'un article présenté à l'Institution of Electrical par A. B. WOOD D. Sc. sur *les perfectionnements récents apportés aux oscillographes à rayons cathodiques* :

L'auteur de l'article développe tout d'abord différents perfectionnements qui permettent la photographie externe ; ceci conduit à des appareils moins encombrants qu'avec dispositif de photographie interne, et à une diminution des prix de revient.

Parmi les améliorations apportées, l'auteur cite :

— La concentration des rayons cathodiques avec utilisation d'un cylindre de WEHNELT monté sur une extrémité de la cathode,

— Puis le dispositif électromagnétique de M. ROGOWSKI.

L'émission électronique aux basses températures a été également

(1) Le texte complet de la communication de M. GUÉRY est conservé aux archives de la Société française des Electriciens ; cette communication fera, en outre, l'objet d'une note à la *Revue générale de l'Electricité*,

considérablement améliorée grâce à l'utilisation des filaments à oxyde de baryum.

Les plaques utilisées pour la photographie doivent comporter des émulsions très riches en particules d'argent ; on peut aussi les « Schumanniser ».

L'effet de luminosité secondaire produit par l'action des rayons cathodiques sur des corps phosphorescents a été utilisé également.

La grande phosphorescence du tungstate de calcium est signalée par l'auteur comme étant particulièrement sensible aux rayons ultra-violets.

M. Woods rappelle ensuite que l'énergie cinétique étant directement proportionnelle au potentiel accélérateur V et le pouvoir de pénétration des rayons dans l'émulsion photographique étant proportionnel à la quatrième puissance de la vitesse des rayons cathodiques, on a avantage à utiliser, pour augmenter la sensibilité photographique, des tensions accélératrices élevées, ce qui a été réalisé pour la première fois par M. Dufour ; cette conception a été suivie, dans sa réalisation, par un grand nombre de constructeurs continentaux et américains.

Lorsque le dispositif photographique est extérieur, les rayons cathodiques peuvent être concentrés et dirigés à travers une feuille d'aluminium très mince ($0{,}8 .\ 10^{-4}$ cm).

Un certain nombre de courbes d'absorption et de perte de vitesse des rayons cathodiques en fonction des épaisseurs de feuilles d'aluminium traversées par eux, est indiqué dans le texte.

L'auteur insiste enfin sur la nécessité de déterminer l'origine « temps » dans les relevés photographiques.

Il décrit un certain nombre de méthodes utilisées avec, à l'appui, les schémas de montage : méthodes mécaniques, électromagnétiques, utilisation des propriétés de la lampe au néon ; montage avec triode comportant dans son circuit grille un condensateur relié en parallèle avec une diode (dispositif de E. V. Appleton, R. A. Watson Watt and J. F. Herd).

Lorsqu'il est nécessaire d'enregistrer des phénomènes avec variations rapides de tension ou d'intensité, un dispositif de référence de temps est indispensable lorsque les phénomènes n'ont pas un caractère périodique.

Enfin, une dernière difficulté est l'enregistrement de haute tension avec pointe, tels que ceux rencontrés dans l'observation de la foudre.

Les dispositifs à diviseur de tension avec utilisation de résistances et de capacité sont mentionnés et le montage de M. Norinder est décrit.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

Electrochimie. — Piles. — Accumulateurs

Application de la Soudure à l'arc dans les constructions navales, métalliques et électriques, par Montperreux. 1 brochure n° 1050 de 24 × 32 cm. de 7 pages, 8 figures. Editée par la librairie Arthaud, 23 Grande Rue, à Grenoble. (Don de l'éditeur).

Cette brochure donne quelques détails sur la soudure à l'arc et les avantages qui en résultent pour les constructions, notamment une économie de poids.

Galvanische Elemente und Akkumulatoren (Elements Galvaniques et accumulateurs), par prof. C. Drucker et Dr A. Finkelstein. 1 volume relié 17 × 25 cm de 425 pages. 140 figures. Edité par l'Akademische Verlagsgesellschaft, M.B.H. à Leipzig (1932). (Don des éditeurs)

Etude théorique et technique d'après des inscriptions de brevets. Historique des piles. Théorie des piles Leclanché, des accumulateurs au plomb et des accumulateurs alcalins. Constitution et fabrication de la pile Leclanché et des accumulateurs au plomb ou au nickel. Un répertoire par numéros d'ordre des brevets anglais, américains et allemands, concernant les piles, les accumulateurs et les machines destinées à des machines accessoires occupe 163 pages.

Publications Scientifiques et Techniques du Ministère de l'Air (Services des recherches de l'Aéronautique). N° 7 Etude sur les constituants des essences. 1 brochure de 19 × 27 cm, de 76 pages. En vente chez Blondel-la Rougery, 7 rue Saint-Lazare, et Gauthiers Villars, 55 quai des Grands-Augustins, Paris.

Première partie. Contribution à l'étude physico-chimique des carbures cyclaniques. Par M. Godchot et Mlle G. Cauquil, préparation des composés hydrocycliques saturés et non saturés, viscosité des carbures cyclaniques, oxydation.

Deuxième partie. Recherches des constituants des essences d'aviation par mesure de densités ou d'indices de réfractions ou de viscosités. Par E. Carrière et R. Lautié. Base de la Méthode de MM. Carrière et Lautié. Etude de la viscosité des essences

Troisième partie. Etude comparative des colonnes à distiller en vue de la séparation des carbures d'hydrogène. Par M. Schmitt. Etude expérimentale Comparaison des colonnes entre elles (cas du pentane et de l'heptane du pétrole).

Canalisations

High voltage cables. Câbles à haute tension, par L. Emanueli, Ingénieur en chef de la Societa Italiana Pirelli et des ateliers généraux de câbles Pirelli. (Conférences faites à la Faculté du Génie Civil de l'université de Londres). Préface de C.-L. Fortescue. 1 volume relié de 14 × 22 cm. de 107 pages. 81 figures. Editée par la librairie Chapman et Hall, Ltd., 11 Henrietta Street, à Londres (1929). Don de l'auteur).

Description des différents types de câbles à haute tension, et matières d'imprégnation. Champ électrostatique. Le diélectrique du câble considéré au point de vue de son imprégnation. Propriétés mécaniques et électriques du câble terminé. Ce chapitre se termine par un court exposé des principes sur lesquels repose la fabrication des câbles dits à remplissage d'huile que l'auteur a inventés.

Télégraphie. — Téléphonie
Transmissions par ondes

The Development of Telephonic Communication in Copenhagen (1881-1931). Publié par la Compagnie de Téléphones de Copenhague. Une brochure de 18 × 27 cm, de 164 pages, 128 figures. Editée par le Danmarks Naturvidenskabelige Samfund, à Copenhague. (1932). Don de la bibliothèque de l'Ecole Polytechnique Royale de Copenhague).

Description du réseau téléphonique de Copenhague. Bureau central principal. Tableaux automatiques. Centre d'appel suburbain. Postes automatiques ruraux. Développement des lignes. Relations entre la compagnie de téléphones et l'Etat.

Cours élémentaire de télégraphie et téléphonie sans fil, par F. Bedeau. docteur ès sciences, agrégé de physique, avec une préface de M. le général Ferrié. membre de l'Institut. Vuibert éditeur, Paris 1931. Volume 25 / 16 cm, de VIII-424 pages, avec 330 figures : 60 francs.

Le nouveau cours de télégraphie et téléphonie sans fil que M. Bedeau a fait paraître l'année dernière est un ouvrage du plus grand mérite, et qui ne fait double emploi avec aucun des traités du même ordre parus jusqu'ici en France ou à l'Etranger.

Ses qualités principales sont, d'une part, une grande clarté d'exposition, un art dans la présentation échelonnée des faits, qui sont le fait d'un excellent professeur; d'autre part, le souci d'être complet, dans la mesure du possible, la place accordée aux méthodes de mesure, le grand nombre et la précision des références, qui trahissent l'ingénieur constructeur. L'auteur est effectivement l'un et l'autre et nous recueillons les fruits de son expérience dans ces deux ordres d'activité.

L'ouvrage de M. Bedeau est qualifié sur sa couverture « d'élémentaire », épithète qui manifestement ne correspond pas à son contenu : celui-ci constitue, en effet, tout ce qu'un très bon ingénieur radioélectricien a besoin de savoir, ou même plus exactement d'avoir sous la main Toutefois l'auteur a évité avec le plus grand soin les développements mathématiques inutilement élevés. Les seules équations différentielles utilisées sont en définitive celles du galvanomètre d'une part, celles des cordes vibrantes d'autre part. Mais dans les livres où une instruction mathématique de cet ordre est exigée du lecteur, on se dispense d'habitude d'expliciter les calculs d'un appareil ou d'une méthode de mesure qui, suivant l'expression consacrée, ne présentent pas de difficultés L'auteur, qui sait par expérience combien de temps prend, à l'occasion, la reconstitution d'un de ces calculs « élémentaires », a eu l'excellente idée d'aller les rechercher dans ses notes et de nous donner, soigneusement conduit jusqu'au bout, le calcul de tous les phénomènes dont il est question dans son texte.

De nombreuses données numériques, les références aux travaux originaux scrupuleusement et complètement fournies, complètent ces calculs et font de l'ouvrage de M. Bedeau non pas un cours élémentaire, mais un précieux ouvrage de référence que tout radioélectricien se félicitera d'avoir sur sa table.

Un certain nombre de chapitres traitent des divers sujets classiques que l'on s'attend à trouver dans un ouvrage de ce genre : généralités sur les oscillateurs de haute fréquence (chap. II), amplificateurs à lampes (III), oscillateurs et détecteurs (IV), récepteurs (V), accouplement des circuits (VI), résistances en haute fréquence (IX), ondes électromagnétiques, doublet (X), postes d'émission, téléphonie sans fil (XI), antennes de réception (XII) Mais l'auteur a tenu à juste titre à les faire précéder de deux chapitres (introd. I) contenant des notions générales d'électrotechnique allant jusqu'à la théorie des filtres, et à leur adjoindre deux chapitres (VII, VIII) sur la propagation du courant sur les lignes : excellent cours élémentaire de transmission téléphonique, devenu indispensable aux radioélectriciens, particulièrement depuis le développement de la radiodiffusion.

Cet ouvrage « complet bien que concis » comme le dit dans la préface le regretté général Ferrié, est certain de recueillir un succès mérité.

IL Y A TRENTE ANS

Réunion ordinaire mensuelle du 9 juillet 1902

Présidence de M. E. DESROZIERS,
Vice-Président.

Des 6 Membres élus dans cette séance, nous comptons encore parmi nous MM. Paul BUNET, SANCHEZ-CUERVO, TURPAIN.

M. J. REY fait une communication sur « *l'Eclat intrinsèque des gros arcs à courant continu.* »

Cette communication est l'exposé des travaux de MM. A. BLONDEL et J. REY entrepris depuis 1894 aux Ateliers Sautter Harlé et Cie.

Le conférencier indique les précautions prises pour obtenir la stabilité des arcs de 25 à 300 A et expose les deux méthodes de mesure employées, l'une directe, l'autre indirecte.

Ces mesures commencées en 1894 et poursuivies en 1897, 1899, 1901 sont traduites par des courbes de forme parabolique donnant, suivant les diamètres des charbons, l'éclat intrinsèque du cratère positif en fonction de la densité de courant dans le charbon positif.

En calculant l'influence du refroidissement des charbons, MM. BLONDEL et REY obtiennent une relation parabolique entre l'éclat et la densité, qui cadre bien avec les courbes d'observation.

En résumé les lois suivantes sont démontrées pratiquement :

1° L'éclat intrinsèque photométrique du cratère, à l'air libre, croît avec la densité du courant dans le charbon positif.

2° A même densité de courant dans le charbon positif, l'éclat intrinsèque augmente avec son diamètre.

3° L'éclat se rapproche d'une valeur constante quand on fait varier, pour une série d'arcs, la densité de courant en raison inverse de la racine carrée du diamètre.

M. J. REY termine en envisageant les objections possibles à la méthode employée et en faisant la critique des méthodes photographiques, de la méthode VIOLLE en particulier.

IL Y A TRENTE ANS

Bulletin N° 18, Août-Septembre-Octobre 1902

Le Bulletin d'Août-Septembre-Octobre 1902 contient le compte-rendu, par M. CHAUMAT, du voyage d'études techniques de l'Ecole Supérieure d'électricité, et les 3 conférences faites aux élèves au cours de ce voyage :

Conférence de M. DUSSAUGEY *sur la protection des lignes aériennes contre la foudre.*

Le Conférencier expose une théorie de la protection des lignes en rappelant les travaux de STEINMETZ sur la décharge d'un condensateur chargé par influence. Il décrit les différents parafoudres connus, insiste sur les principes de leur montage, les emplacements les plus favorables, et termine par quelques mots sur les parafoudres entre conducteurs.

Conférence de M. LÉPINE sur *l'usine génératrice de Champ.*

L'usine génératrice de Champ, édifiée par la Société hydro-électrique de Fure et Morge, est très clairement et complètement décrite dans tous ses détails, depuis les travaux de la prise d'eau jusqu'aux tableaux et canalisations ; les divers rendements des turbines, machines, transformateurs, lignes, etc... sont soigneusement notés.

Conférence de M. ROUTIN *sur les régulateurs automatiques et le compoundage électromécanique des groupes électrogènes.*

M. ROUTIN définit ce qu'il appelle le compoundage électromécanique des groupes électrogènes.

Il expose la théorie du réglage mécanique dans les usines hydroélectriques et décrit les servo-moteurs employés à l'usine de Champ.

Il préconise une solution fondée sur l'équilibre entre le couple moteur et le couple résistant, et en expose la réalisation.

BAR-LE-DUC. — IMP. COMTE-JACQUET *Le gérant :* Alfred MAGNIER.

5e série, tome II, n° 21.

Septembre 1932

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ FRANÇAISE
DES
ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET DISCUSSIONS (1) :

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

EXPOSÉ D'UN ENCHAINEMENT DES CONNAISSANCES NÉCESSAIRES A L'ÉTUDE DE L'ÉLECTROTECHNIQUE. (1)

par M. Paul BUNET

Ce mémoire développe des idées acquises au cours d'une pratique déjà longue de l'électrotechnique et de travaux ayant pour objet essentiel ses diverses applications aux réalisations. L'auteur, qui s'est bien trouvé de cet enchaînement pense qu'il y aurait intérêt à orienter dans ce sens l'étude et l'enseignement de l'électricité, constituant ainsi une sorte de bagage minimum et rationnel dont doivent être pourvus ceux qui veulent en faire leur carrière auquel ils apporteront des additions selon leurs besoins. Nous ne présentons, du reste, qu'un large cadre dans lequel une grande liberté et une grande initiative resteraient à tous, et surtout aux maîtres chargés de l'enseignement, chacun d'eux devant toujours imprimer à ses cours la marque de sa personnalité.

Toutes nos connaissances en électricité, comme en toute science du reste, sont basées sur l'expérience. Nos théories ne sont que des essais d'explications de faits expérimentaux et de raccordement de certains d'entre eux, qui paraissent à première vue d'essence différente, en un système général. La base d'un exposé de l'électrotechnique doit être un ensemble de faits expérimentaux bien connus. Il en est un petit nombre dont l'usage à cet égard est devenu universel et classique. Sont-ils tous bien choisis ?

Partir de la masse magnétique n'est certainement pas recommandable et devrait être évité, car aucune expérience ne pousse à admettre sûrement son existence, et toute expérience qui a des contradicteurs sérieux doit être écartée des bases. La loi de COULOMB donnant la force qui s'exerce entre des masses magnétiques, n'a pas une valeur universellement accordée : au point de vue expérimental, elle n'a jamais été vérifiée autrement qu'avec une approximation plutôt grossière. Supprimons donc la notion de masse magnétique, au moins comme notion primordiale, en la laissant dans la catégorie de ces conceptions annexes et complémentaires auxquelles chacun sera libre de revenir dans la limite de ses goûts, s'il en a besoin.

---

(1) Ce rapport, présenté à la séance du 15 mars 1932 de la 6e section, sera discuté pendant la prochaine semaine de Discussions de Novembre.

Nous devons également écarter, au début de notre exposé, tout ce qui fait l'objet de discussions ne pouvant recevoir de solution définitive en l état actuel de nos connaissances. Ainsi, les considérations sur la perméabilité de vide et ses dimensions ne peuvent trouver raisonnablement place dans nos fondations, car aucune expérience certaine ne permet de trancher dans un sens ou dans l'autre.

Perméabilité et constante diélectrique sont presque toujours présentées comme des quantités dont le produit a nécessairement des dimensions (2) alors que les prendre (sauf pour des recherches théoriques de haute envergure qui viendront dans ces compléments facultatifs dont nous parlions) pour de simples coefficients numériques, supprimerait des difficultés et des discussions sans fin. Rien cependant n'est plus artificiel que cette nécessité de ne pas pouvoir se passer de dimensions pour l'une et l'autre de ces quantités, en ne les présentant pas comme des rapports entre ce qui aurait lieu dans l'air (ou le vide) et ce qui a lieu dans un milieu déterminé placé au même endroit.

D'autre part, nous devons bien nous garder de faire un système nouveau. Nous devons rester dans le système C.G.S. électromagnétique tel qu'il est, avec ses avantages et ses inconvénients; nous ne devons modifier aucune formule adoptée par les professeurs dans leurs cours et les techniciens dans leurs applications.

Se servir de plusieurs systèmes en même temps est mauvais; cela empêche quelquefois de voir clairement et crée des confusions. Nous nous limiterons au système électromagnétique, en écartant le système électrostatique. Ce ne sera qu'un système annexe, qu'on peut trouver parfois commode du reste (3).

Une sérieuse difficulté provient de la nécessité de donner des noms aux quantités dont nous parlons. On pourrait du reste la supprimer en ne se servant que de lettres internationalement admises, comme on le fait, à la satisfaction de tous, pour le pH en électrochimie. Si l'on tient aux noms, il n'y a qu'un accord possible, c'est celui qui est basé sur le suffrage universel, chacun considérant ensuite comme un devoir d'observer une discipline indispensable quoique cela puisse choquer ses goûts. Aussi, quoique quelques inconvénients aient été opposés à cette appel

(2) Nous avons notamment trouvé l'opinion contraire dans un écrit d'un savant et ingénieur de grande valeur M. C. L. Fortescue « Aucune de nos déterminations pratiques journalières ne rend l'une et l'autre de ces quantités autre chose que des facteurs numériques ».

(3) Nous nous sommes servi de l'emploi des deux systèmes à la fois pour établir certaines relations par la simple considération de l'homogénéité nécessaire (*Bulletin de la Société Française des Electriciens*, septembre 1930).

lation, le terme de densité de flux (flux density) qui satisfait les Américains, les Canadiens, les Japonais, beaucoup d'Anglais, un grand nombre de Français et d'Allemands, etc., paraîtrait devoir l'emporter en cas de référendum universel et le mot induction, qui ne signifie au fond pas grand'chose, battu. Ne devrions-nous pas adopter densité? Dans cet exposé, nous l'appellerons B pour réduire les discussions et parce que cela suffit.

D'autres difficultés proviennent du choix des noms des unités. Des divergences apparaissent au sujet de l'adoption de systèmes dits homogènes ou pratiques, etc. Nous ne nous occupons pas ici de ces côtés de la question.

Ce qui suit est un simple exemple de développement rationnel de l'électrotechnique. Il est bien évident qu'on peut modifier l'ordre d'exposition, varier les commentaires, changer l'importance relative des divers faits expérimentaux de départ, etc.

Premier groupe de faits expérimentaux.

Pile, électrolyse, loi d'Ohm. — La pile donne la notion de courant électrique; la décomposition électrolytique complète cette notion. Des voltamètres différents en série amènent à la loi de Faraday qui donne une définition du courant dont une certaine unité libérera une certaine masse d'hydrogène.

Les notions de force électromotrice et d'addition des forces électromotrices s'introduisent par la mise en série des piles.

L'expérience consistant à prendre des piles de grande surface d'électrodes, en nombre plus ou moins grand en série, et des voltamètres de très grande surface (résistances intérieures négligeables) avec le circuit de liaison composé de fils de diverses longueurs, sections, matières, conduit à la loi d'Ohm.

Il faut définir deux des grandeurs qui interviennent dans la loi d'Ohm; on le pourrait au moyen de l'électrochimie. Mais on préfère les rattacher à un système mécanique.

La considération de l'énergie électrochimique et celle de la conservation de l'énergie amènent aux notions d'énergie électrique et de puissance.

A ce premier groupe de faits expérimentaux on peut rattacher, si l'on désire tout de suite parler des théories modernes, d'autres faits

expérimentaux sur le grain d'électricité insécable et le développement élémentaire des idées fondamentales sur les électrons qui conduisent aux mêmes notions de courants, forces électromotrices, etc.

Deuxième groupe de faits expérimentaux.

L'aimant, le magnétisme. — L'aimant nous est connu par une constatation expérimentale. Il est entouré d'un champ magnétique (expression qualitative).

L'attraction de la limaille de fer et sa disposition autour d'un aimant, en spectre magnétique, nous suggère l'idée de lignes de magnétisme, qu'on a appelées lignes de force et autres noms.

Ces lignes que trace la limaille de fer nous amènent la notion de direction ; la façon dont elles sont serrées nous donne une idée de grandeur (où beaucoup voient naturellement une densité). En somme, c'est ainsi un vecteur qui apparaît : nous l'appellerons B, sans plus.

Si, dans une surface tracée, passe un certain nombre de ces lignes, l'idée de flux s'introduit. La notion d'un coefficient de proportionnalité ou d'une perméabilité vient aussi ; les lignes de forces se resserrent dans un corps magnétique amené dans le champ de l'aimant : on les voit se rapprocher beaucoup pour entrer dans une pièce de fer où notre œil les devine ainsi serrées.

Tout cela n'a pas une précision suffisante.

Troisième groupe de faits expérimentaux.

Ampère, les forces entre conducteurs parcourus par des courants. — L'expérience montre la manifestation de forces d'attraction ou de répulsion entre des conducteurs parcourus par des courants. Ampère a donné une loi entre éléments de conducteurs dont il a eu la géniale intuition à la suite de ses expériences sur des conducteurs réels et finis. Toutes les intégrations faites dans tous les cas particuliers vérifient expérimentalement la formule d'Ampère.

Prenons deux fils parallèles avec courants i et i' placés à la distance d, la force par unité de longueur, normale aux fils, est $f = k.2ii' : d$ par intégration de la formule d'Ampère.

On peut faire k quelconque et baser ainsi des systèmes d'unités différents. Faisons $k = 1$; nous avons $f = \frac{2i^2}{d}$ si les deux fils sont en série, et dans le vide ou l'air.

Nous prenons f en dynes par centimètre, d en centimètres. De là une définition des dimensions exactes et précises du courant et sa mesure mécanique au moyen de la balance.

Quatrième groupe de faits expérimentaux :

L'aimantation due aux courants : action des courants et des champs magnétiques. — Un conducteur parcouru par un courant est entouré d'un champ magnétique. Le spectre obtenu expérimentalement au moyen de limaille

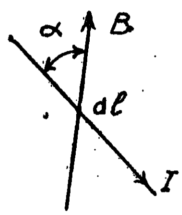


Fig. 1.

de fer montre les dispositions qui se manifestent au voisinage des aimants. Un courant dans un fil cylindrique est entouré de lignes de force circulaires dans un plan normal au fil, d'où la notion d'un B égal en grandeur le long d'une circonférence et de direction tangentielle.

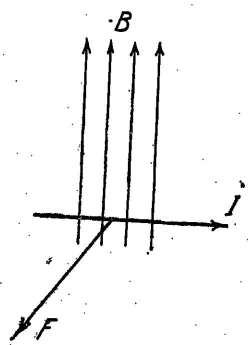


Fig. 2.

De même que les aimants agissent entre eux, les champs magnétiques agissent sur les courants et inversement (Oersted).

L'expérience montre qu'un conducteur placé dans un champ magnétique est soumis à une force. Des millions de faits expérimentaux conduisent à vérifier une loi différentielle (Laplace) entre un courant élémentaire et le vecteur B caractérisant l'état magnétique du

point où se trouve l'élément $dF = BIdl \sin \alpha$. Si $\alpha = \frac{\pi}{2}$, un conducteur de longueur l placé dans un champ où B est uniformément distribué sera le siège d'une force BIl dans la direction indiquée.

Comme I est déterminé déjà, nous obtenons la définition de l'unité de B et ses dimensions, ainsi que le moyen de mesure, par une méthode mécanique, comme une pesée. De là aussi la détermination de l'unité et de la mesure des flux.

Cinquième groupe de faits expérimentaux :

Loi de l'induction. — Faraday a énoncé, que, dans un circuit fermé embrassant un flux Φ, toute variation de ce flux produit une force électromotrice ou tension $\frac{d\Phi}{dt}$ (signe à choisir), d'effet identique à la force électromotrice ou tension des piles. Rien ne peut avoir un caractère plus expérimental qu'une telle constatation.

Cette loi est aussi vérifiée par des millions de faits, et on peut l'admettre comme un point de départ de la nomenclature électrique. Mais elle n'est en somme qu'une conséquence de ce que nous avons déjà admis; nous voulons dire que, si l'on voit quelque objection à prendre la loi de Laplace comme un de ces points de départ, on pourra tout aussi bien la laisser de côté, adopter la loi de l'induction et procéder en sens inverse ([1]).

([1]) En effet prenons dans un plan XY normal à B un petit rectangle xy. Le flux contenu est Bxy Le courant i le long du rectangle est supposé très faible. Les

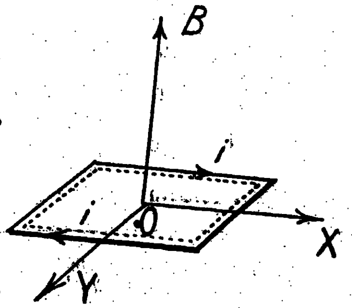


Fig. 3.

forces qui s'exercent sur les quatre côtés, sont deux à deux, Bix et Biy (Laplace) et elles tendent à comprimer ou distendre le rectangle sur ses quatre côtés. Pour faire passer i dans le cadre, il suffit d'introduire une tension surmontant sa résistance, soit Ri. Appliquons le principe des déplacements virtuels en supposant par

De là la définition de la tension, la fixation de ses dimensions, de son unité, et notre système se trouve ainsi complété avec des définitions et unités tirées du système C.G.S pour

— Courant, Résistance, Tension, Puissance, Energie.
— Flux, B, et quantités annexes : Densité de courant.
— Quantité, etc.

FORCE MAGNÉTOMOTRICE ; CIRCUIT MAGNÉTIQUE.

Un courant I' donne lieu à des lignes de force circulaires dans les plans qui lui sont normaux. En P on a le vecteur B. La perméabilité du milieu est μ.

Pour connaître la valeur de B, plaçons en P un conducteur extrême-

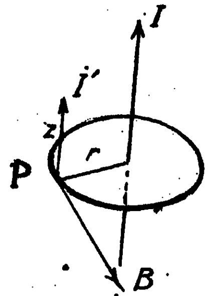


Fig. 4.

ment petit, de longueur z, parcouru par un courant I' très petit aussi, de telle sorte que la distribution de B n'en soit pas affectée. Nous avons $F = \frac{2II'}{r} z\mu$ (Ampère) $F = BI'z$ (Laplace pour l'expression de la force sur le conducteur auxiliaire. De là $B = \frac{2I}{r}\mu$. Si nous suivons la circonférence avec un B constant on a $Bl = B\, 2\pi r = 4\pi I\mu$ et si nous ne suivons pas une circonférence, $4\pi I\mu = \int B dl$; force *magnétomotrice* est généralement la désignation de $4\pi I$; *force magnétisante*

exemple, des mouvements dx et dy sur chacun des côtés constitués par une matière infiniment élastique, pendant le temps dt. Le travail virtuel est

$$T = 2Bi(x dy + y dx) = Bi dS$$

qui ne peut que compenser de l'énergie électrique fournie. i restant fixe, il a donc fallu pour le maintenir ainsi que se manifeste une tension électrique supplémentaire u (Faraday) telle que $u i dt = Bi dS$ d'où $u = B \frac{dS}{dt} = \frac{d\Phi}{dt}$ quel que soit i, même à la limite pour $i = 0$.

celle de $4\pi I : l$. De là le remplacement de I par nI, le circuit magnétique. la valeur du B pour un solénoïde infiniment long, l'influence des bouts du solénoide court, etc.

Développement de l'étude de l'électrotechnique.

Cela posé, il suffit de continuer de la manière ordinaire; nous pourrons traiter tout ce qui est généralement abordé dans l'étude des courants continus et alternatifs, l'établissement des machines, le fonctionnement des lignes courtes, la propagation de courants variables dans des barres massives, etc. Une seule notion doit être laissée de côté : celle de charges électriques et plus particulièrement l'étude des condensateurs. En général, on recourt à l'électrostatique et à la loi de Coulomb donnant la force entre quantités d'électricité élémentaires, qui celle-là est exacte et vérifiée expérimentalement. Mais c'est justement ce que nous voulons éviter. car nous retomberions sur un système différent du système électromagnétique et nous créerions avec l'imprécision des dimensions de la perméabilité et de la constante diélectrique, ces discussions que nous voulons éviter.

Nous allons donc essayer de tirer la notion de capacité autrement, en l'introduisant dans la succession d'expositions que nous venons de faire.

Vitesse de transmission des manifestations de l'électricité.

Jusqu'ici nous n'avons tenu aucun compte de cette vitesse; elle ne s'introduit pas dans nos formules.

La vitesse de propagation étant finie, il en résulte cependant que, lorsque l'on ferme un générateur sur un circuit dont l'extrémité est dans un certain état, il faut nécessairement que quelque émissaire (courant, électrons...) aille reconnaître cet état, et cela prend du temps. Jusque là un certain *courant* existe toujours, même à circuit ouvert et avec une tension rigoureusement continue (5).

(5) Par exemple. on sait que si un circuit comprend un générateur de courant, des fils enroulés de façon quelconque, un condensateur, l'allure initiale du courant de fermeture donnée par $\frac{di}{dt}$ est la même quelle que soit la capacité du condensateur, même s'il est en court-circuit. Mais nous n'avons aucun moyen de l'établir en suivant notre mode d'exposition. Nous devons donc faire comme si nous l'ignorions.

Deux fils assez longs AB et CD, de résistance totale r, placés l'un près de l'autre, sont réunis à un générateur de courant continu dont la tension est U au moyen d'interrupteurs (ou d'un seul interrupteur).

Le circuit est ouvert en BD avec un isolement général parfait. Les points B et D étant très voisins, aucune tension initiale n'existait entre eux.

Le courant, avant la fermeture des interrupteurs, était nul ; il l'est encore au bout d'un temps suffisamment long θ (en pratique ce temps est très court), celui de l'application de la loi D'OHM, avec $R = \infty$.

Le générateur a livré une quantité $\int_0^\theta i\,dt$, avec une certaine loi de i.

Il a fourni une énergie $U \int_0^\theta i dt$.

La résistance a dissipé en chaleur $\int_0^\theta ri^2 dt$.

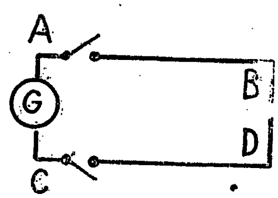


Fig. 5.

Nous n'av ns pas à tenir compte de l'inductance dans la balance de l'énergie : l'accumulation $\frac{1}{2} Li^2$ étant nulle initialement et finalement. Afin de simplifier notre exposé, nous ne parlerons pas de l'inductance (on pourrait cependant la garder si l'on y tenait absolument).

L'excès $U \int_0^\theta i dt - \int_0^\theta ri^2 dt$, s'il existe, est resté dans le système.

Appelons v la tension de A à B augmentée de celle de D à C. Au départ $v = U$; à la fin $t = \theta$, $v = 0$.

En général $\int ri^2 dt = \int vi dt$, et si nous adoptons une certaine moyenne pour v, v moy. entre o et θ, nous pouvons écrire $\int_0^\theta ri^2 dt = v \text{ moy.} \int_0^\theta i dt$.

$\int_0^\theta ri^2 dt$ ne peut être nul que si i est nul en permanence, et la notion de vitesse finie nous empêche de faire cette hypothèse. Donc

$$v \text{ moy.} \int_0^\theta i dt$$

n'est pas nul et $\int_0^\theta i dt = \int_0^\theta dQ = Q$ existe

La différence

$$U\int_0^{\theta} i\mathrm{d}t - \int_0^{\theta} ri^2\mathrm{d}t = U - v \text{ moy.} \int_0^{\theta} i\mathrm{d}t = (U - v \text{ moy.})\ Q\ (6).$$

existe donc réellement.

Adoptant les mots du langage courant, on traduit cela en disant que cette énergie est *condensée* sur les conducteurs, qui constituent alors les armatures d'un *condensateur*, et toujours en suivant les idées courantes, on tombe dans la notion d'une *capacité* qui contient cette énergie. Nous concevons que cette *capacité* constituée par le système des deux fils *existe parce que la vitesse de l'électricité est finie*. Si celle-ci était infinie, en nous servant toujours du langage courant, les points A et C, seraient avertis immédiatement de la discontinuité du circuit entre B et D; la tension U s'établirait immédiatement d'un bout à l'autre, sans envoi de courant en reconnaissance. Plus grande sera la

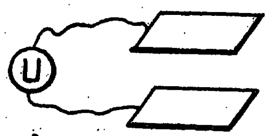


Fig. 6.

vitesse, moins importante sera la période pendant laquelle le courant circule à circuit ouvert. Nous devons donc, en continuant notre exposé selon la marche adoptée depuis le début, trouver forcément, dans l'expression de cette capacité, l'indication bien nette de la vitesse de l'électricité, la capacité ainsi définie augmentant lorsque cette vitesse diminue.

Ces considérations, d'importance capitale, se trouvent masquées quand on se sert parallèlement des deux systèmes différents, électrostatique et électromagnétique, comme c'est l'usage ordinaire.

Condensateurs

Les fils AB et CD, d'abord fins, étant choisis plus gros par réunion d'une quantité de fils fins jointifs constituant la section totale, le

(6) Avec de la hardiesse nous pourrions prendre v moy. $= \frac{U}{2}$ et arriver à $\frac{1}{2}$ UQ que des considérations ultérieures vérifieront. Mais ce n'est pas utile.

courant i pendant cette période initiale augmentera : la capacité croît avec la dimension des conducteurs. Ces dimensions et la capacité peuvent n'être pas homogènes d'un bout à l'autre. En particulier, on peut avoir deux fils fins terminés à leurs extrémités par des conducteurs de grandes dimensions, comme deux plaques. Quoique les fils soient longs et les plaques courtes, le rapport des dimensions transversales peut être tel que toute la capacité soit pratiqueme t constituée par le système de plaques ; celle des fils devient négligeable (fig. 6).

Nous définirons la capacité du condensateur par le rapport de la quantité d'électricité mise en jeu pour le charger et de la tension $C = Q : U$, cette proportionnalité résultant de ce que nous n'avons pas d'autre force électromotrice indépendante dans le circuit que U et qu'alors les courants i lui sont proportionnels.

On a coutume de dire que le condensateur contient l'énergie accumulée, mais on dit tout aussi bien qu'il contient la quantité $Q = \int i dt$. Si un condensateur a entre ses armatures une tension variable avec le temps u_0, il contiendra à cet instant une quantité $\int i dt = Cu_0$.

La séparation du condensateur chargé du générateur se fait, sans aucune manifestation, par l'ouverture d'interrupteurs qui ne sont parcourus par aucun courant, aucune tension n'apparaissant au point de coupure.

Le bon isolement conserve le *conducteur chargé*. La réunion des armatures provoque la décharge.

Les problèmes de la charge au moyen d'une tension continue, de la décharge, du fonctionnement dans les circuits où la tension est alternative ou même quelconque, se traitent tous au moyen de cette équation, indiquant qu'à chaque instant la somme des tensions prise par chacun des appareils en série fait équilibre à la force électromotrice appliquée :

$$e = ri + L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int i dt$$

Nous trouverons ainsi toutes les formules qui correspondent à toutes les applications qui comportent des condensateurs.

Mais il nous manque toujours quelque chose ; c'est l'expression de la capacité au moyen des dimensions du condensateur. D'après ce que nous savons déjà, nous ne pouvons y arriver qu'en introduisant la vitesse de l'électricité. Ceci nous amène à traiter de la propagation

sur des circuits qui ne sont pas extrêmement courts, problème que nous avons dû laisser de côté jusqu'ici. Prenons donc une ligne composée d'un fil et de son retour (autre fil ou la terre); attribuons à chaque élément dx, entre ses extrémités, une variation de tension $ZIdx$ due à la résistance et l'inductance, et une variation de courant $Yudx$ due à la perte de courant par mauvais isolement et à la charge du condensateur que constitue l'élément de ligne avec retour (autre ligne ou terre) ; ce condensateur élémentaire a une capacité cdx, la part d'inductance de l'élément étant ldx. En appliquant ce que nous savons déjà, nous trouverons les équations générales classiques

$$\frac{d^2I}{dx^2} = YZI \quad \text{et} \quad \frac{d^2U}{dx^2} = YZU.$$

Nous pourrons appliquer leurs intégrales générales à divers cas, par exemple, à l'état transitoire lors de la fermeture d'un générateur de tension continue sur une ligne ouverte de résistance très faible.

Nous trouverons que cette ligne est le siège d'oscillations d'une fréquence fondamentale et de ses harmoniques impairs et la formule donnant la fréquence fondamentale sera $f = \frac{1}{4X\sqrt{cl}}$, X étant la longueur de la ligne.

D'autre part, cette oscillation implique une longueur d'onde λ; les oscillations sont en quart d'onde, et la longueur d'onde fondamentale $\lambda = 4X$. La vitesse de propagation $v = \lambda f = \frac{1}{\sqrt{cl}}$.

Tout cela est contenu dans les deux formules différentielles.(7)

Nous savons déterminer l'inductance des lignes ; ainsi, celle de deux fils cylindriques de rayon r et de distance d'axes D, par unité de longueur de chaque conducteur est $l = 2 \log \frac{D}{r}$; il en résulte que la capacité c par unité de longueur de chacun des fils est $c = \frac{1}{2V^2 \log. \frac{D}{r}}$.

Au lieu de deux fils, prenons deux plaques de grandes dimensions A normales à la figure, de longueur X très grande aussi. Nous aurons également $V = \frac{1}{\sqrt{cl}}$.

Pour l'unité de courant, on a un flux : $L = \mu \frac{4\pi XD}{A}$.

(7) La diffusion dans le public des idées de longueur d'onde, de circuits accordés, etc., grâce au développement des radiocommunications, permet certainement d'introduire rapidement de telles notions.

Comme $V = \frac{X}{\sqrt{LC}}$, C étant la capacité de l'ensemble, on obtient $C = \frac{AX}{4\pi D V^2 \mu}$; le produit AX est la surface d'une armature. Dans les isolants courants, $\mu = 1$. On arrive à la formule $C = \frac{S}{4\pi D V^2}$ identique à celle dont se servent les constructeurs de condensateurs à air, soit $C = \frac{S}{11,3 D}$ 10^{-21} (avec $V = 2{,}995.10^{10}$ cm : s). On peut

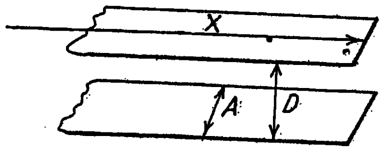


Fig. 7

convenir de désigner toujours par V_0 la vitesse de propagation dans le vide (ou l'air). Dans un autre corps, la vitesse est $V = \frac{V_0}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$ (ce qui définira ε par le seul fait d'écrire cette relation, puisque μ est déjà défini.

Un condensateur avec diélectrique courant non magnétique aura pour capacité $C = \frac{\varepsilon S}{4\pi D V_0^2}$; où ε est un coefficient numérique caractérisant le diélectrique. Nous avons ainsi l'expression de la capacité de tous les condensateurs utilisés dans les applications du courant électrique, par des extensions faciles.

Loi de Coulomb.

Electricité statique. — Si un condensateur plan est chargé à la tension U par un générateur de courant continu, les deux appareils restant reliés, et qu'on déplace les armatures de dD, la capacité varie de dC; la charge varie de UdC et le générateur fournit en énergie U^2dC; le condensateur ne s'accroît que de $\frac{1}{2} U^2$dC. Il reste ainsi $\frac{1}{2} U^2$dC qui ne peut que représenter le travail nécessaire au déplacement des armatures. Il y a donc une force normale F entre armatures, (de signe + pour une attraction afin de fixer un sens) et Fd$D = -\frac{1}{2} U^2$dC qu'on peut mettre sous la forme $F = \frac{2\pi}{\varepsilon} \frac{Q}{S} Q$.

Pour une surface partielle d'une des armatures possédant une charge q, la force sera $f = \frac{2\pi}{\varepsilon} \frac{Q}{S} q$, formule qui dérive de la loi de Coulomb $\varphi = \frac{qq'}{r^2} \frac{1}{\varepsilon}$ entre la charge q et une charge q' sur une très petite surface de l'autre armature placée à une distance r, φ étant dirigé selon la ligne qui joint les deux petites surfaces choisies. On sait, en effet, que f et F peuvent s'obtenir directement sans autre considération que la formule de Coulomb donnant φ, consacrée par l'expérience. C'est pour nous une vérification finale précieuse.

L'électrostatique peut ensuite être présentée de la manière ordinaire, mais en opérant toujours dans le système d'unités électromagnétiques, c'est-à-dire en conservant $C = \frac{\varepsilon S}{4\pi D V_0^2}$.

Autres systèmes possibles.

Le procédé d'exposition qui précède a le grand avantage de ne rien changer de capital à ce qui est admis par tous ceux qui appliquent leurs connaissances à des réalisations. En particulier, le système électromagnétique, malgré certaines imperfections, doit être conservé pour l'instant, de l'avis quasi unanime.

On pourrait évidemment partir d'autres considérations primordiales. Au lieu de pile et formule d'Ampère, nous pourrions commencer par le bâton de cire frotté à la peau de chat, et les armatures de condensateurs. La notion de vitesse de propagation n'interviendrait pas alors et nous pourrions écrire $C = \frac{\varepsilon S}{4\pi D}$ par définition d'un coefficient k qui deviendrait égal à l'unité. C'est le système électrostatique. Pour revenir à la loi d'Ampère, il nous faudrait nécessairement introduire V qui apparaîtra explicitement dans l'expression des courants, et alors μ et ε resteront sans dimensions.

Développements ultérieurs.

En partant d'un exposé du genre de celui qui précède, on peut rejoindre diverses conceptions plus ou moins différentes ou compliquées, mais généralement moins souvent utiles, sans s'astreindre à les reprendre depuis leurs points de départ.

Ainsi, on arrive directement aux équations de MAXWELL relatives à un milieu conducteur quelconque liant B à la densité de courant et au champ électrique, sans s'astreindre à passer par la force magnétique s'exerçant sur un pôle d'aimant et en laissant de côté, si l'on veut, un grand nombre de considérations intermédiaires. Le génial traité de MAXWELL n'en sera pas moins toujours consulté avec beaucoup de fruit, d'autant plus peut-être que l'on ne s'efforcera pas de le faire accepter comme un ouvrage classique d'ensemble, ce qu'il ne peut être.

Tous ceux qui s'occupent d'électricité auront du reste tout intérêt à connaître les ouvrages complémentaires qui traitent d'autres (et particulièrement de nouveaux) procédés de calcul et d'investigation permettant d'aborder plus aisément ou plus entièrement certaines questions; là intervient la tournure particulière de l'esprit de chacun. Mais sans prétendre devenir complètement familiers avec eux, beaucoup aiment à en connaître l'existence et avoir une idée suffisante de leur contenu dans ses points principaux, afin de s'y reporter en les étudiant davantage lorsque, au cours de leurs travaux, ils en éprouveront le besoin.

Nous préférons que la vitesse V de propagation dans un milieu soit $V = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} V_0$, le vide (ou pratiquement l'air) étant caractérisé par la vitesse V_0, avec $\varepsilon_0 = 1$ et $\mu_0 = 1$, et ne pas nous astreindre à écrire $V = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$ en donnant à ε_0 et μ_0 des dimensions sur lesquelles aucun des partisans de cette dernière formule n'a la moindre idée, car cela ne peut qu'amener les discussions stériles, forcément sans fin, auxquelles nous assistons, qui ont déjà bien compromis l'universalité du langage que s'étaient efforcés d'atteindre nos devanciers.

Nous n'avons pas parlé d'une différence d'essence à introduire entre le champ (quantitatif) et l'induction électromagnétique en disant même que l'on peut éviter de prononcer les deux mots. La notion de B (qui est la densité de flux en beaucoup de pays) ou tout autre nom sans ambiguïté mis à sa place, jointe à celle de force magnétomotrice, nous suffit et suffit certainement à la majorité des électriciens.

Au reste, nous comprenons parfaitement que, dans certaines théories de caractère élevé, il puisse y avoir quelque avantage réel à introduire, entre autres conceptions, celles de champs de caractères divers, indépendants ou non de la notion d'induction. Nul ne songe à repousser les exposés qui permettent de poursuivre des hypothèses plus ou moins

hardies, peu accessibles souvent, pas très claires même parfois, mais qui, maniées par les maîtres de la Physique, leur livreront pourtant de brillantes conséquences. Qu'importe même s'il se présente quelques divergences d'opinion dans les définitions et les propriétés de quantités portant le même nom? Ces savants ne doivent pas être astreints à se mouvoir dans ces voies strictement tracées dont ne doivent pas sortir les élèves et les techniciens réalisateurs, voies qui ne doivent surtout pas être encombrées par des notions peu claires, sur lesquelles un accord universel se manifeste comme impossible à obtenir.

ÉTUDE SUR LES LIGNES COURTES DE TRANSMISSION D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE (1)

par M. Marcel MATHIEU

La présente note a pour objet de résumer les résultats auxquels nous sommes arrivés en étudiant les lignes courtes de transmission d'énergie électrique.

A. — DIAGRAMME DES FONCTIONNEMENTS POSSIBLES D'UNE LIGNE DONNÉE :

Le diagramme des tensions entre fil et neutre conduit facilement à l'équation générale suivante :

$$\frac{U_g^2}{U_r^2} \times \frac{1}{z^2} = \left(\frac{P_r}{U_r^2} + \frac{r}{z^2}\right)^2 + \left(\frac{l\omega}{z^2} \pm \frac{Q_r}{U_r^2}\right)^2 \qquad (1)$$

dans laquelle :

U_g et U_r sont les tensions entre fil et neutre au départ et à l'arrivée ;

P_r, la puissance reçue ;

Q_r, la puissance magnétisante reçue (avec le signe + pour l'énergie inductive, et avec le signe — pour l'énergie capacitive).

r, la résistance d'une phase de la ligne ;

$l\omega$, la réactance d'une phase ;

et z, l'impédance d'une phase $z = \sqrt{r^2 + l^2\omega^2}$,

Cette équation est souvent appelée « équation du cercle ». Nous considérons qu'elle exprime la relation de Pythagore dans un triangle rectangle d'hypoténuse :

$$\frac{U_g}{U_r} \times \frac{1}{z}$$

et de côtés :

$$\left(\frac{P_r}{U_r^2} + \frac{r}{z^2}\right) \quad \text{et} \quad \left(\frac{l\omega}{z^2} \pm \frac{Q_r}{U_r^2}\right)$$

et cela est le principe du diagramme que nous proposons.

Pour une ligne donnée, r, $l\omega$ et z sont connus, nous nous imposons

(1) Cette communication présentée à la séance du 7 juin 1932, de la 4e Section du Comité d'administration de la Société française des Électriciens sera discuté a la Semaine de novembre 1932.

une chute de tension, c'est-à-dire un rapport donné pour les valeurs de U_g et U_r ; on posera :

$$\frac{U_g}{U_r} = k.$$

Cette condition nous conduit au diagramme de la figure 1.

La condition

$$\frac{U_g}{U_r} = k$$

sera remplie pour les fonctionnements suivants :

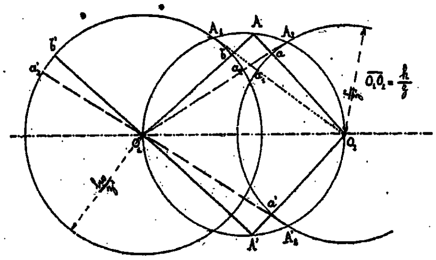


Fig. 1.

1° *Point quelconque A.*

$$P_r = U_r^2 \times \overline{Aa.}$$

$\overline{Aa}$ étant mesurée à l'échelle des rayons des cercles tracés.

$$Q_r = U_r^2 \times \overline{Ab.}$$

Q_r étant une puissance magnétisante inductive.

2° *Point quelconque A'.*

$$P_r = U_r^2 \times \overline{A'a'}$$

$$Q'_r = U_r^2 \times \overline{A'b'}$$

Q'_r étant une puissance magnétisante capacitive.

3° *Point limite A_1.*

Il correspond à : $Q_r = 0$ et à $P_r = P_{r\,max} = U_r^2 \times \overline{A_1a_1}$.

4° *Point limite A_2.*

Il correspond à $P_r = 0$ et à $Q_r = Q_{r\,max}$ (ind.) $= U_r^2 \times \overline{A_2a_2}$.

5° *Point limite A'_2.*

Il correspond à $P_r = 0$ et à $Q_r = Q'_{r\,max}$ (cap.) $= U_r^2 \times \overline{A'_2a'_2}$.

B. — Formules générales.

L'équation précédente (1) permet de trouver les formules de $P_{r\,max}$, $Q_{r\,max}$ et $Q'_{r\,max}$, en faisant $Q_r = 0$ ou $P_r = 0$.

On obtient :

$$P_{r\,max} = U_r^2 \left[\frac{1}{z}\sqrt{\frac{r^2}{z^2} + k^2 - 1} - \frac{r}{z^2}\right] \tag{2}$$

$$Q_{r\,max} = U_r^2 \left[\frac{1}{z}\sqrt{\frac{l^2\omega^2}{z^2} + k^2 - 1} - \frac{l\omega}{z^2}\right] \tag{3}$$

$$Q'_{r\,max} = U_r^2 \left[\frac{1}{z}\sqrt{\frac{l^2\omega^2}{z^2} + k^2 - 1} + \frac{l\omega}{z^2}\right]. \tag{4}$$

C. — Influence de la variation de $l\omega$.

Si nous faisons varier l'inductance propre de la ligne les valeurs limites de P_r et Q_r pourront également varier tout en conservant la relation entre les tensions.

$$\frac{U_g}{U_r} = k.$$

Pour faire varier $l\omega$ il suffit d'intercaler sur la ligne des capacités en série (2) ou un système équivalent.

On devra remplacer dans les formules précédentes : $l\omega$ par :

$$l\omega - \frac{1}{C\omega} = l'\omega$$

et z devra être pris avec sa nouvelle valeur :

$$\sqrt{r^2 + l'^2\omega^2}.$$

Un cas particulièrement intéressant est celui où la capacité C vient produire un effet annulant l'inductance de la ligne :

$$l'\omega = l\omega - \frac{1}{C\omega} = 0.$$

Dans ce cas on a : $z = r$.

et les formules précédentes deviennent :

$$P_{r\,max} = U_r^2 \frac{k^2 - 1}{r}, \tag{5}$$

$$Q_{r\,max} = U_r^2 \frac{\sqrt{k^2 - 1}}{r}. \tag{6}$$

---

(2) Voir « Condensateurs sur les réseaux », par M. Bunet (*Bulletin de la Société française des Electriciens*, août 1929, pages 851 à 882).

La mise en service de condensateurs pour compenser l'inductance de la ligne permet donc d'augmenter la puissance transmissible si les autres conditions de fonctionnement de la ligne le permettent (vérifier l'échauffement des conducteurs et le rendement électrique de la ligne).

De toutes façons on peut affirmer que la chute de tension sera diminuée pour une même puissance transmise, ainsi pour une ligne de 25 km de longueur, de 75 mm² de section de cuivre, on peut transmettre par phase 1 000 kW avec un rapport : $\frac{U_g}{U_r} = 1{,}10$ lorsqu'il n'y a pas de condensateurs et ce rapport devient $\frac{U_g}{U_r} = 1{,}03$ lorsque l'on met en série des condensateurs pour compenser l'inductance de la ligne (à 15 000 V).

Il est bon de vérifier que l'emploi de condensateurs ne conduit pas à des surtensions dangereuses.

On peut calculer :

$$\beta = \frac{U'_g}{U_g}.$$

U'_g étant la tension après les condensateurs entre fil et neutre. La formule générale est :

$$\beta^2 = \frac{z^2}{k^2}\left[\left(\frac{k^2 P_r}{U_g^2} + \frac{r}{z^2}\right)^2 + \left(\frac{k^2 Q_r}{U_g^2} + \frac{l\omega}{z^2}\right)^2\right]. \qquad (7)$$

Elle ne conduit pas à des valeurs dangereuses lorsqu'on se contente de compenser l'inductance de la ligne.

D. — Influence de la variation de r.

En partant de l'équation générale (1) on peut rechercher ce que deviennent $P_{r\,\max}$, et $Q_{r\,\max}$ lorsque r varie.

Un cas particulièrement intéressant est celui de :

$$\frac{r}{l\omega} = 1,$$

c'est-à-dire que l'on a : $z = l\omega\sqrt{2}$.

Dans ce cas le maximum de P_r et le maximum de Q_r sont égaux numériquement et l'on a :

$$P_{1r\,\max} = Q_{1r\,\max} = U_r^2\left[\frac{1}{l\omega\sqrt{2}}\sqrt{k^2 - \frac{1}{2}} - \frac{1}{2l\omega}\right]. \qquad (8)$$

Enfin un cas limite (d'ailleurs sans signification physique), est celui de $r = 0$ qui conduit d'après l'équation (1) à :

$$P_{0r\,\max} = U_r^2\,\frac{1}{l\omega}\sqrt{k^2 - 1} \qquad (9)$$

et

$$Q_{0r\,max} = U_r^2 \frac{1}{r\omega} (k - 1). \qquad (10)$$

Pour l'étude des variations de P_r et Q_r en fonction de r il est commode de considérer les rapports :

$$\frac{Q_{0r\,max}}{Q_{1r\,max}} = \frac{(k-1)\sqrt{2}}{\sqrt{k^2 - \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2}}} \qquad (11)$$

$$\frac{P_{0r\,max}}{Q_{0r\,max}} = \frac{\sqrt{k^2-1}}{k-1}. \qquad (12)$$

On remarquera que le premier de ces rapports (11) atteint la valeur de 1,06 pour $k = 1,10$ et le second (12) la valeur 4,57. Pratiquement on peut en conclure que l'influence de la température ambiante sera à peu près sans effet sensible sur la valeur de $Q_{r\,max}$.

E. — Condition d'échauffement des conducteurs.

Il est facile de trouver que la limite de puissance apparente transmissible est :

$$P_{rl} = Q_{rl} = U_r I_l = U_r \sqrt{\frac{\pi w s\sqrt{a s}}{\rho} 10^{3}}. \qquad (13)$$

w = nombre de watts dissipés par cm² de surface extérieure du conducteur.

s = section en mm² du conducteur.

ρ = résistivité à chaud en microhms : cm.

a = 1,27 pour fil rond plein.

a = 1,66 (en moyenne) pour un câble.

F. — Condition de rendement électrique de la ligne :

En appelant σ le rendement électrique d'une ligne :

$$\sigma = \frac{P_r}{P_r + rI^2} = \frac{U_r I}{U_r I + rI^2}$$

on détermine l'intensité qu'il ne faut pas dépasser :

$$I = U_r \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{s}{10\rho L}, \qquad (14)$$

L, étant la longueur de la ligne en km.

La puissance limite est donc :

$$(U_r I) = U_r^2 \frac{1-\sigma}{\sigma} \frac{s}{10\rho L}. \qquad (15)$$

G. — Conclusions.

Pour étudier le fonctionnement électrique d'une ligne courte il faut donc considérer :

1° la limite de puissance transmissible avec l'échauffement normal du conducteur (paragraphe E.)

2° la limite de puissance transmissible avec le rendement électrique de la ligne (paragraphe F.)

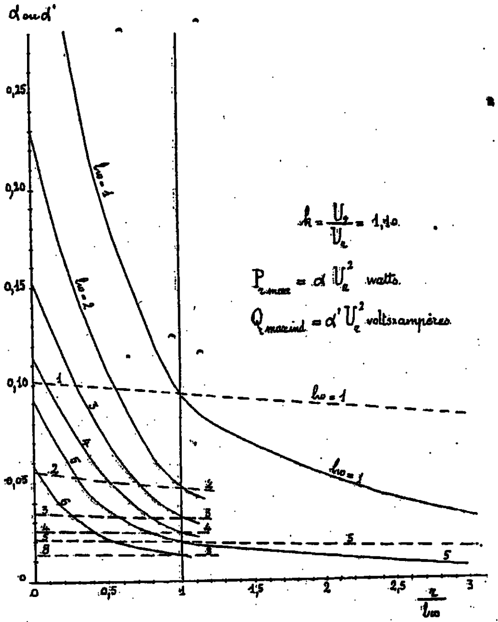


Fig. 2.

3° les différents régimes possibles compatibles avec la condition du rapport donné des tensions à l'arrivée et au départ (paragraphes A et B).

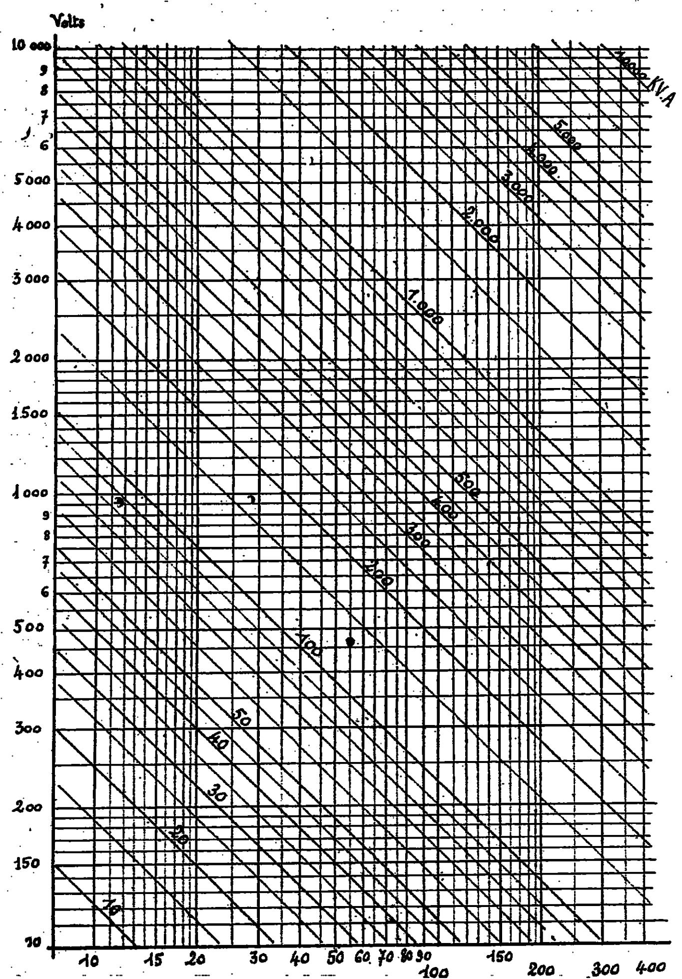
Les formules ci-dessus sont générales, elles se simplifient lorsqu'on considère chaque cas particulier. Nous avons établi des graphiques qui permettent de résoudre rapidement tous les problèmes relatifs à une ligne en cuivre $(\rho = 2{,}1)$ et en admettant :

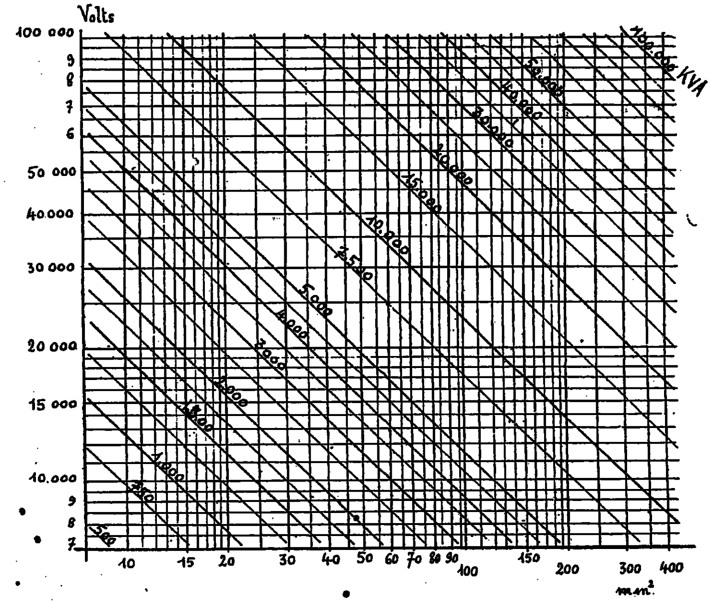
$$k = 1{,}10$$

$$\varpi = 0{,}1 \text{ watt par cm}^2.$$

et $$\sigma = 0{,}90.$$

Un graphique donne pour $k = 1{,}10$, et en fonction du rapport





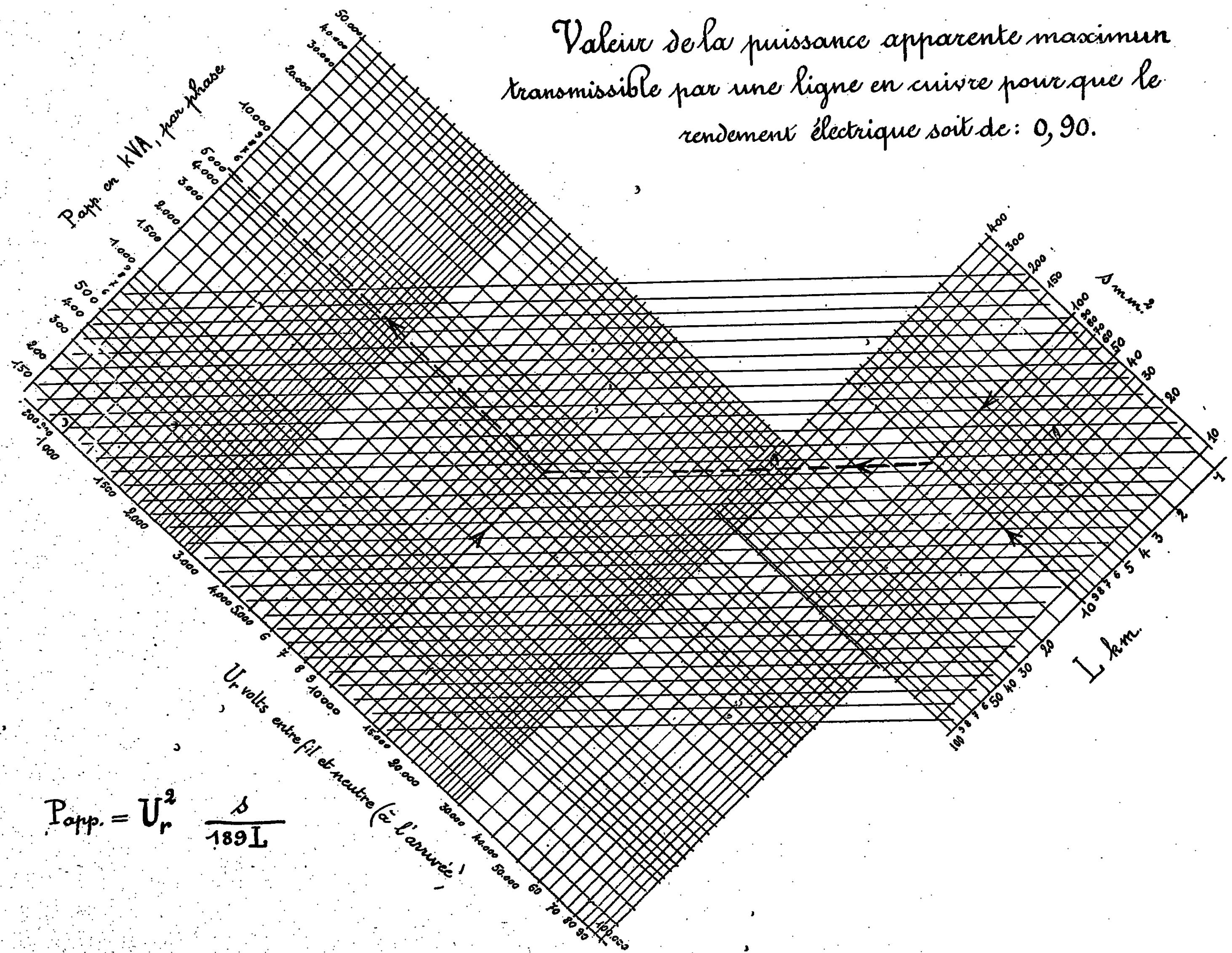
Valeur de la puissance apparente maximum transmissible par un câble de cuivre

Puissance apparente en kVA par phase.
Tension à l'arrivée entre fil et neutre, en Volts
Section du câble en mm^2.
(perte de 0,1 watt par cm^2 de surface extérieure.)

mm²

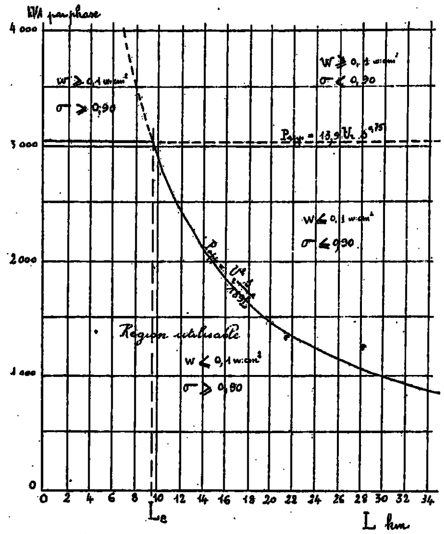
$P_{app.}$ en VA = 13,9 $U_r \, s^{0,75}$

Fig. 3.



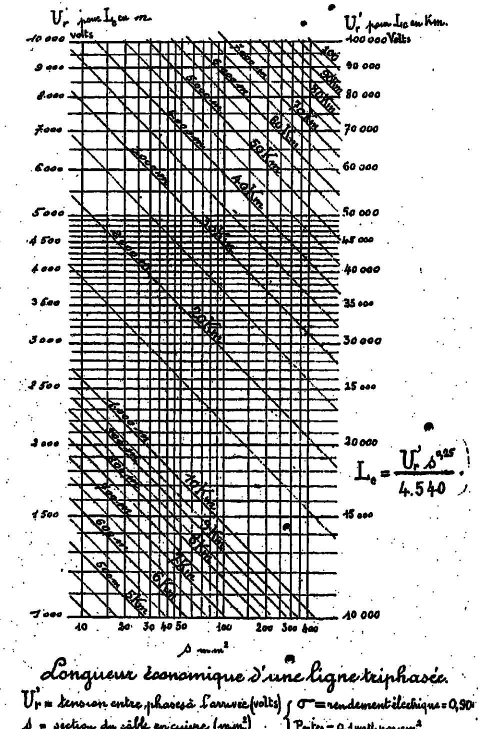
$$P_{app.} = U_r^2 \; \frac{s}{189 L}$$

Fig. 4.



KVA par phase
4 000
3 000
2 000
1 000
0
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 34
Le
L km
Région utilisable
σ ≥ 0,90
σ ≤ 0,90

Fig .



10 000
5 000
1 000
10 20 30 40 50 100 200 300 400
100 000 Volts
50 000
10 000
Longueur économique d'une ligne triphasée.
U'r = tension entre phases à l'arrivée (volts)
s = section du câble en cuivre (m.m²)
σ = rendement électrique = 0,90
Pertes = 0,1 watt par cm²

Fig. 6.

$\frac{r}{l\omega}$ et de la valeur de $l\omega$, les facteurs, par lesquels il faut multiplier U_r^2 pour avoir $P_{r\ max}$ et $Q_{r\ max}$. Ce graphique est général, et s'applique quelle que soit la nature de la ligne. (Fig. 2).

Un abaque à échelles logarithmiques donne la valeur de la puissance apparente maximum transmissible par un câble de cuivre pour que la condition limite d'échauffement soit atteinte

$$P_{app} \text{ en V.A} = 13{,}9\ U_r\ s^{0{,}75} \text{ (fig. 3).}$$

Enfin un autre abaque logarithmique donne la valeur de la puissance maxima transmissible par une ligne en cuivre pour que la condition limite de rendement soit atteinte $\left(P = U_r^2 \frac{s}{189L}\right)$ (figure 4).

Un graphique formé des deux courbes : $P = 13{,}9\ U_r\ s^{0{,}75}$ et $P = U_r^2 \frac{s}{189L}$ en fonction de P et L et calculées pour

$$U'_r = 15\ 000 \text{ V} \quad \text{et} \quad s = 75 \text{ mm}^2 \text{ de cuivre}$$

nous divise l'espace en 4 régions dont une seule est utilisable pour que les deux conditions soient remplies. (Figure 5).

Un graphique à échelles logarithmiques permet de trouver la valeur de L_e, longueur (en km) de ligne telle que les 2 conditions (échauffement et rendement) soient remplies pour une tension donnée à l'arrivée et une section de cuivre donnée pour les conducteurs. Inversement ce graphique permet de trouver la tension à l'arrivée pour que la ligne donnée (L, et s) soit telle que les deux conditions : échauffement et rendement soient remplies. (fig. 6).

LES COURANTS DE COURT-CIRCUIT DANS LES RÉSEAUX TRIPHASÉS LEUR DÉTERMINATION A L'AIDE D'UNE TABLE DE CALCUL ÉLECTRIQUE (1)

par M. François Cahen

Ingénieur à la Société Générale de Constructions Electriques et Mécaniques (Als-Thom).

Après un rappel sommaire de quelques notions fondamentales relatives à la définition des courants de court-circuit, ainsi qu'aux méthodes permettant leur prédétermination, l'auteur donne la description d'une table de calcul électrique qui vient d'être réalisée par l'Office d'Etudes des Grands Réseaux de Transport d'Energie (Alsthom) en vue d'abréger la durée des calculs qui s'y rapportent. Il montre ensuite comment l'on peut, avec cette table, déterminer les différentes catégories de courants de court-circuit en appliquant les procédés classiques et notamment la méthode dite des coordonnées symétriques.

INTRODUCTION

Parmi les problèmes qui se posent à l'occasion de l'étude des installations de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique en courant alternatif, le calcul des courants de court-circuit est l'un de ceux auquel l'on se plaît, à juste titre à accorder la plus grande importance.

A cette détermination se trouve en effet subordonné, dans des cas très nombreux, le choix logique des caractéristiques, dimensions, ou encore du mode de réalisation de certains éléments essentiels des installations.

Nous citerons notamment à ce sujet :

— La détermination du pouvoir de coupure des interrupteurs à huile.

— L'étude rationnelle des systèmes de protection contre les surintensités et défauts de toute nature, la prédétermination de leur sensibilité, le choix du calibre des relais.

---

(1) Ce rapport sera discuté à la Semaine de discussions de novembre 1932.

— Le choix des impédances de point neutre destinées à limiter le courant de défaut en cas de mise à la terre d'une phase.

— La détermination des caractéristiques des bobines de mise à la terre du point neutre des réseaux ne comportant pas de point neutre accessible.

— Le calcul des réactances destinées à réduire l'importance des courants de court-circuit, notamment dans les réseaux interconnectés.

— L'étude de la résistance de l'appareillage et des canalisations montées sur supports isolants, aux effets mécaniques et thermiques des courants de court-circuit intenses.

Sans présenter de difficultés particulières, le calcul des courants de court-circuit peut toutefois donner lieu à de longs développements, dès que la configuration des réseaux atteint une certaine complexité (réseaux bouclés ou maillés), ou lorsqu'ils comportent de nombreuses sources d'énergie interconnectées.

Ces calculs peuvent se trouver grandement simplifiés par l'emploi d'une table (2), alimentées à basse tension, sur laquelle on figure les divers éléments d'un réseau en représentant à une échelle convenable celles de leurs constantes qui interviennent dans la détermination des courants de court-circuit.

Nous nous proposons, dans la présente étude, après avoir rappelé quelques notions relatives à la définition et au calcul des courants de court-circuit, de donner la description sommaire d'une table récemment réalisée selon ce principe et de montrer comment elle se prête à un calcul aisé des différentes catégories de courant de défaut.

I. — Rappel de quelques notions relatives aux courts-circuits

L'on ne saurait définir le courant de court-circuit en un point d'un réseau sans prendre en considération, d'une part, l'instant auquel on l'envisage et d'autre part, la nature du défaut.

Variation du courant de court-circuit avec le temps.

On sait que le courant de court-circuit de chaque phase d'un alternateur atteint sa valeur maximum dans la première demi-période qui suit son établissement, que cette valeur n'est pas la même dans

(2) Voir notamment :
W. W. Lewis : A New short circuit calculating Table. *General Electric Review*, août 1920.
R. D. Ewans : Finding Single Phase short circuit currents on calculating Boards. *Electrical World*, avril 1925.

les différentes phases et qu'elle est la plus élevée lorsque la tension de l'une d'elles est nulle au moment où le court-circuit se produit.

On a coutume de distinguer :

a) Le courant initial total ou dissymétrique que l'on peut décomposer en deux éléments :

Une composante continue, dont la grandeur dépend de la valeur de la tension au moment du court-circuit.

Une composante alternative, dite « courant initial symétrique », dont l'amplitude est à peu près indépendante de la tension initiale.

Le courant initial dépend, dans une certaine mesure, de l'excitation préalable de l'alternateur, ou, si l'on préfère, de la grandeur et de la phase de l'intensité préexistant dans l'induit. Il ne dépend évidemment pas des modifications susceptibles d'être apportées à l'excitation par le système de régulation.

b) le courant permanent.

Sa valeur dépend essentiellement du système de régulation de la tension de l'alternateur :

Si la tension est réglée à la main, le courant permanent est seulement fonction de l'excitation préalable, c'est-à-dire, pour une tension donnée, de la grandeur et de la phase de l'intensité préexistant dans l'induit.

Si l'alternateur est muni d'un régulateur automatique de tension, le courant permanent ne dépend plus de la valeur de l'excitation préalable, mais seulement des caractéristiques générales du circuit d'excitation et du système de régulation. Le courant permanent est, alors, sensiblement plus élevé que dans le cas précédent.

Il en est encore de même si, en dehors du régulateur de tension, l'alternateur est muni d'un régulateur spécial, dit de surréglage, ayant pour effet d'augmenter considérablement son excitation au moment du court-circuit. Un tel dispositif est utilisé couramment, à l'heure actuelle, pour améliorer la stabilité des transports d'énergie à longue distance, en évitant autant que possible le décrochage des machines synchrones qui leur sont connectées. Dans ce cas, le courant permanent atteint une valeur encore plus élevée que précédemment, et souvent assez voisine du courant initial symétrique.

La composante continue apparaissant à l'instant initial s'amortit très rapidement (en quelques périodes).

Quant à la composante alternative, elle atteint en général sa valeur permanente en un temps beaucoup plus long, de l'ordre d'une seconde ou plus.

Nature du défaut.

L'on se trouve, en pratique, en présence de l'un des cas suivants :
Court-circuit entre une phase et la terre.
Court-circuit entre deux phases et la terre.
Court-circuit entre deux phases sans mise à la terre.
Court-circuit entre 3 phases, avec ou sans mise à la terre.

Le calcul des courants correspondant à ces divers types de défauts peut donner des résultats très différents, comme l'a montré M. FALLOU dans sa très intéressante communication faite à la Société Française des Electriciens en 1926 (3).

Choix entre les diverses valeurs du courant de court-circuit.

Il n'est pas nécessaire, en général, de calculer toutes les valeurs des courants de court-circuit, telles qu'elles résultent des définitions que nous venons de donner. Mais, dans la plupart des cas, il n'est pas possible non plus de se contenter d'une seule détermination. Pour faire un choix, il convient de prendre en considération l'objet même de l'étude. Nous en donnons, ci-après, quelques exemples :

Pouvoir de coupure des interrupteurs. — Le cas le plus défavorable, dans le cas de réseaux étendus, comportant des impédances inverses élevées (lignes, transformateurs) est en général le court-circuit triphasé, parfois le court-circuit entre deux phases. S'il s'agit d'un réseau alimenté directement par des alternateurs, avec neutre mis à la terre directement, le court-circuit entre phase et terre peut au contraire être le plus élevé.

On doit d'autre part considérer, soit le courant initial symétrique, soit le courant permanent, soit une valeur intermédiaire.

Dans le cas de réseaux importants, de réalisation moderne, le courant coupé par l'interrupteur est assez voisin du courant initial symétrique. L'on cherche en effet, dans le but d'accroître la stabilité et la sécurité des transports d'énergie, à obtenir l'élimination des défauts dans un temps aussi bref que possible, grâce à l'emploi de dispositifs de protection sélective très rapides et d'interrupteurs assurant la coupure d'un défaut dans un temps très réduit. D'autre part, nous avons indiqué plus haut que les dispositifs de régulation automatique

(3) J. FALLOU, Calcul des courants de court-circuit dans les réseaux triphasés. *Bulletin de la S. F. E.*, septembre 1926.

et de surréglage, dont sont munis à l'heure actuelle de nombreux alternateurs, avaient pour effet d'accroître la valeur du courant permanent et parfois même de l'amener à une valeur très voisine du courant initial symétrique. Pour les raisons qui viennent d'être données, il paraît prudent de baser le dimensionnement des interrupteurs sur la valeur du courant initial symétrique. L'on commet ainsi une approximation par excès, mais la marge de sécurité qui en résulte n'est pas excessive.

Il n'est pas nécessaire, par contre, de tenir compte de la composante continue, qui est en général amortie au moment où la coupure s'effectue.

Lorsque l'on est certain que la coupure ne peut se produire avant le temps nécessaire à l'établissement du courant permanent, c'est celui-ci qu'il convient de prendre en considération.

Dans d'autres cas enfin, l'on peut admettre une valeur intermédiaire entre le courant permanent et le courant initial symétrique.

Dispositifs de protection.

La nature de la protection recherchée définit, bien entendu, le type de courant de court-circuit qu'il faut calculer.

Il suffit, en général, de considérer le courant de court-circuit permanent, car l'étude de la sensibilité d'un système de protection doit être basée sur la plus faible valeur du courant de défaut susceptible de se produire.

Parfois, il peut être utile de calculer également le courant initial symétrique, dans le but de déterminer, par exemple, les limites extrêmes entre lesquelles sont comprises les intensités, tensions ou puissances agissant sur les relais de protection.

Pour étudier les dimensions d'une impédance de mise à la terre du neutre il suffit, le plus souvent, de connaître le courant permanent maximum susceptible de la traverser, car l'on prévoit toujours ces appareils pour supporter le courant de défaut pendant un temps très supérieur à la durée d'établissement du courant permanent.

Résistance de l'appareillage et des canalisations aux effets mécaniques et thermiques.

Dans le calcul des efforts électrodynamiques s'exerçant en cas de court-circuit sur les conducteurs et sur leurs supports, c'est la valeur la plus élevée du courant qu'il y a lieu de faire intervenir, c'est-à-dire

le courant initial dissymétrique. Il peut être utile également, en vue de déterminer les contraintes prolongées auxquelles peuvent être soumis conducteurs et supports, de connaître la courbe d'amortissement du courant.

Cette connaissance est nécessaire aussi pour l'étude de l'échauffement des conducteurs pendant la durée du court-circuit.

II. — Méthode générale de calcul

La méthode classique, basée sur l'emploi des chutes inductives de tension, ne permet pas de déterminer le courant de court-circuit correspondant à un défaut dissymétrique. Elle ne donne de résultats suffisamment approchés que dans le cas très exceptionnel du court-circuit triphasé. Encore convient-il, notamment pour le calcul du courant permanent, de ne l'appliquer qu'avec prudence, en tenant compte de la nature (intensité et facteur de puissance) de la charge des alternateurs au moment de l'apparition du défaut, des modifications apportées à l'état des appareils récepteurs et, s'il y a lieu, aux machines génératrices (machines synchrones munies de régulateurs de tension, de dispositifs de surréglage ou encore de régulateurs limiteurs d'intensité).

Pour déterminer avec un degré d'approximation suffisante les différents courants de court-circuit intervenant dans la solution des problèmes qui viennent d'être énumérés, la méthode la plus simple et la plus générale est celle dite des composantes symétriques, basée sur la théorie des régimes déséquilibrés de Fortescue.

M. Fallou [4] a montré clairement les avantages de ce procédé et exposé une théorie d'un caractère très général, s'appliquant indifféremment au calcul des courants dus aux défauts symétriques et dissymétriques. Nous n'y reviendrons pas ici, nous bornant à rappeler les règles fondamentales de cette méthode :

a) *Dans un réseau stable, le courant de défaut est égal à celui que fournirait un alternateur unique dont la force électromotrice serait égale à la tension normale du réseau à l'endroit du court-circuit et dont les impédances seraient égales aux impédances en parallèle de tous les générateurs et de tous les récepteurs aboutissant à ce point.*

b) *Dans un réseau stable fonctionnant en charge, le courant de court-circuit dans une branche se calcule en considérant le réseau fonction-*

(4) J. Fallou, *loc. cit.*

nant à vide et en majorant le résultat du courant équilibré qui circule normalement dans cette branche.

c) *Dans le cas où les forces électromotrices des générateurs ou les impédances directes des récepteurs ne conservent pas leur valeur lors de l'établissement du court-circuit, il convient de remplacer, dans les calculs, la tension normale du réseau et le courant équilibré préexistant, par une tension fictive et un courant fictif dans le calcul desquels interviennent les valeurs des nouvelles forces électromotrices et impédances.*

Le calcul du courant de défaut dans un réseau complexe se trouve donc ramené à la détermination du courant de court-circuit aux bornes d'un alternateur fonctionnant à vide, ce qui ne nécessite que l'application de quelques formules très simples.

Cette méthode repose, ainsi que nous venons de le voir, sur la détermination des impédances équivalentes aux impédances en parallèle de tous les circuits aboutissant à l'endroit du défaut envisagé.

Ce calcul doit être effectué séparément pour les impédances des systèmes direct, inverse et monophasé.

III. — Principe de la table de calcul électrique

Elle permet de donner au problème précédent une solution presque immédiate, quelle que soit la complexité du réseau étudié, une fois connues les impédances directes, inverses et monophasées de ses différents éléments constitutifs.

Le principe de la table est le suivant : On représente chacun des éléments du réseau par une impédance proportionnelle à son impédance de phase réelle ramenée à une tension de référence unique et l'on établit entre ces impédances figuratives les mêmes connexions que celles qui existent en réalité. On réunit en parallèle l'origine de toutes les impédances figurant des machines génératrices ou réceptrices et l'on applique, entre cette origine commune et le point du réseau fictif où l'on désire établir le court-circuit, une source de courant fournissant une différence de potentiel connue. Le quotient de la différence de potentiel par le courant total traversant la source, est égal, à un facteur de proportionnalité près, à l'impédance équivalente de tous les circuits en parallèle aboutissant au défaut.

En donnant successivement aux impédances figuratives des valeurs proportionnelles aux impédances des trois systèmes direct, inverse et monophasé, on détermine ainsi les impédances totales équivalentes de chacun d'eux.

En mesurant le courant dans chacune des branches aboutissant au défaut, on obtient la valeur des impédances totales équivalentes de chacune d'entre elles, élément nécessaire pour la détermination du courant de court-circuit partiel qui les traverse.

D'une façon plus générale, la mesure de l'intensité dans un élément quelconque du réseau figuré permet une évaluation aisée du courant de court-circuit partiel qui la traverse. Le rapport de cette intensité à l'intensité totale, mesurée au préalable, est en effet égal au coefficient par lequel il convient de multiplier les composantes symétriques du courant de défaut dans les formules donnant la valeur des composantes symétriques du courant traversant l'élément envisagé.

Pour donner des résultats rigoureux, la table de calcul devrait être alimentée à l'aide d'une source alternative, et les éléments figuratifs devraient être constitués par des groupements de résistances, réactances et susceptances reproduisant exactement les impédances de chacune des parties du réseau réel.

En pratique, on peut simplifier notablement la représentation des phénomènes en négligeant les résistances et capacités et en ne tenant compte que des réactances.

Cette approximation est permise. En effet, dans un réseau alternatif, la résistance d'un alternateur ou d'un moteur est très faible par rapport à sa réactance. La résistance d'un transformateur est également faible : les transformateurs de moyenne et grande puissance ont des chutes inductives au moins égales à 8 pour cent, et des chutes ohmiques de l'ordre de 1 pour cent. Seules, les lignes présentent des résistances beaucoup plus voisines de leurs réactances ; mais, si l'on considère l'ensemble d'un réseau comportant des alternateurs, des transformateurs, des lignes et des moteurs, l'erreur que l'on commet en remplaçant son impédance équivalente par sa réactance équivalente n'est jamais très grande.

Pour nous rendre compte de son importance, considérons un réseau dont l'impédance équivalente est $z = r + js$. Son module est

$$\sqrt{r^2 + s^2}.$$

Pour que l'erreur commise en négligeant la résistance r atteigne 10 pour cent, il faut que cette résistance r soit égale à 48 pour cent de s, ce qui ne se réalisera que très rarement.

En pratique, l'erreur est toujours inférieure à celle qui résulte de l'incertitude régnant sur les caractéristiques de certains éléments et notamment celles des appareils récepteurs.

En ce qui concerne la capacité, celle des alternateurs et des trans-

formateurs est, en tout cas, négligeable. Quant à celle des lignes, elle n'intervient pratiquement qu'en cas de défaut à la terre, et surtout s'il s'agit de câbles souterrains. On peut en tenir compte s'il y a lieu par une correction appropriée.

De toute façon, le fait de négliger les résistances et capacités conduit à une évaluation *par excès* des courants de court-circuit.

Grâce à l'assimilation de toutes les impédances à des réactances, il est possible de simplifier encore la réalisation de la table en représentant les réactances par des *résistances* et en adoptant une alimentation en courant continu.

IV. — Description de la table de calcul électrique

La table de calcul se compose essentiellement d'un certain nombre d'éléments de résistance réglable, que l'on associe à l'aide d'un système de fiches et de jacks, de manière à reproduire la constitution du réseau.

Les origines de toutes les résistances figurant les machines génératrices et réceptrices, sont reliées au pôle positif d'une génératrice à courant continu, le point où l'on désire établir un défaut est relié à son pôle négatif.

Des clés permettent d'introduire un ampèremètre dans la connexion aboutissant au pôle négatif, ou de la mettre en série avec l'une quelconque des résistances, de façon à mesurer, soit le courant total, soit le courant partiel circulant dans l'une des branches du réseau fictif.

Le schéma des connexions est représenté ci-après (fig. 1).

Le courant continu est fourni à la tension de 100 V par un groupe convertisseur non figuré sur le schéma. L'arrivée du courant sur la table se fait sur une planchette à bornes (V) reliée, à travers un interrupteur bipolaire (U), à deux barres générales de distribution (M) positive et négative. Un rhéostat potentiométrique (X) permet de maintenir la tension sur les barres à la valeur que l'on se fixe (en général 100 V). Le contrôle de la tension se fait à l'aide d'un voltmètre de précision (S) que l'on met en service à l'aide d'un interrupteur (T). Une lampe témoin (V) indique si les barres sont sous tension.

La barre positive est reliée à une série de jacks, dits positifs (D) permettant le branchement des résistances figuratives des machines génératrices ou réceptrices. Une résistance de 200 Ω (B) est montée en série avec chacun de ces jacks de façon à éviter la mise en court-circuit franc de la génératrice en cas de fausse manœuvre.

La barre négative est reliée à deux fiches, dites négatives (H) et à deux jacks, dits négatifs (F) servant à l'établissement des court-circuits. Dans le circuit de chacune des fiches négatives se trouvent placées une clé de coupure (K), servant à l'établissement ou à la coupure du courant et une clé de mesure (L) permettant de raccorder la fiche aux barres (N) en vue de la mesure du courant total qui la traverse.

Les résistances réglables (A) sont constituées chacune par deux

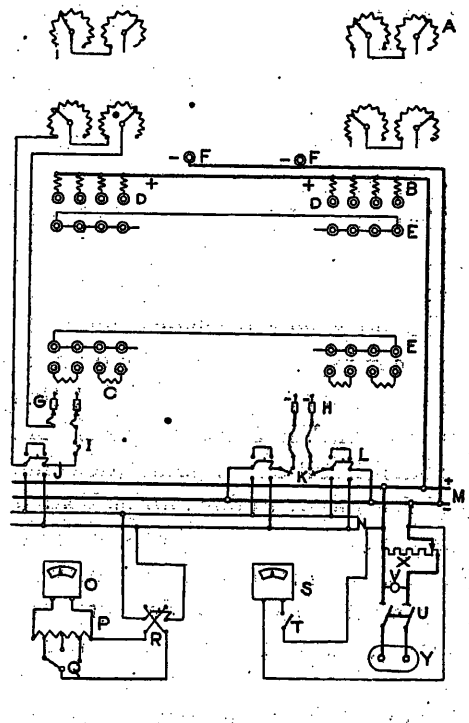


Fig. 1. — Schéma des connexions.

rhéostats à décade associés en série et comportant respectivement 10 éléments de 1 000 Ω et 10 éléments de 100 Ω ; ce qui permet de réaliser tous les multiples de 100 Ω compris entre 100 et 11 000 Ω Les extrémités de chacune des résistances (A) sont reliées par des cordons souples à 2 fiches (G). Dans le circuit de chaque résistance se trouvent placées : une clé de coupure (I) servant à sa mise en service ou à sa suppression et une clé de mesure (J), permettant de raccorder la résistance aux barres (N) en vue de la mesure du courant qui la traverse.

La mesure s'effectue à l'aide d'un milliampèremètre (O) branché

sur un shunt universel (P) à 3 sensibilités, commandé par un commutateur (Q). Un inverseur (R) est utilisé pour obtenir la polarité convenable aux bornes de l'appareil.

Des résistances additionnelles (C) aboutissant à 2 jacks, peuvent être mises en série avec les résistances réglables dans le cas où certaines d'entre elles auraient une valeur insuffisante.

La réalisation du schéma du réseau figuratif s'effectue à l'aide des jacks d'intercommunication (E). Chaque jack comporte 2 contacts reliés respectivement à l'un des contacts des deux jacks avoisinant. 2 fiches introduites dans deux jacks contigus sont donc reliées électriquement, alors que 2 fiches placées dans deux jacks non contigus restent isolées.

La représentation d'un réseau s'effectue alors de la façon suivante :

Les résistances réglables figurant les réactances des machines génératrices et réceptrices sont reliées par une de leurs fiches aux jacks positifs (D), et par l'autre fiche à des jacks d'intercommunication (E). On figure ensuite les autres éléments du réseau à l'aide de résistances réglables proportionnelles à leur réactance, en insérant leurs fiches dans les jacks d'intercommunication. Les extrémités des résistances représentant des circuits connectés en un point (barres de centrale, poste, sous-station) sont placées dans des jacks contigus.

Pour figurer un court-circuit en un point quelconque du réseau, on introduit l'une des fiches négatives dans un jack attenant à ceux occupés par les fiches extrêmes des circuits y aboutissant.

Il suffit alors d'abaisser l'une des clés de mesure pour lire, soit le courant total, soit le courant dans une des branches voisines du défaut, soit enfin le courant traversant un élément quelconque.

En déplaçant la fiche négative, sans toucher à la configuration générale du réseau figuratif, on peut représenter successivement des court-circuits se produisant en n'importe quel endroit du réseau.

La figure 2 montre l'aspect extérieur de la table.

Conçue selon le principe des meubles téléphoniques, elle comporte un pupitre incliné supportant les appareils de mesure, les clés et les fiches, surmonté d'un panneau vertical sur lequel sont montés les rhéostats à décades et les différents jacks.

Les résistances fixes, non visibles, sont placées à l'intérieur du meuble, ainsi que les connexions et les cordons des fiches.

Le potentiomètre et les rhéostats d'excitation de la génératrice sont placés dans un coffre placé sous le pupitre et l'on aperçoit, sur le panneau inférieur gauche, leurs volants de commande.

Le groupe convertisseur servant à l'alimentation de la table est

monté à l'extérieur du meuble; sa mise en route et son arrêt sont commandés à distance à l'aide des boutons poussoirs que l'on voit à l'extrémité gauche du pupitre.

Toutes les manœuvres de mise en service du groupe et de réglage de la tension s'effectuent donc depuis le pupitre.

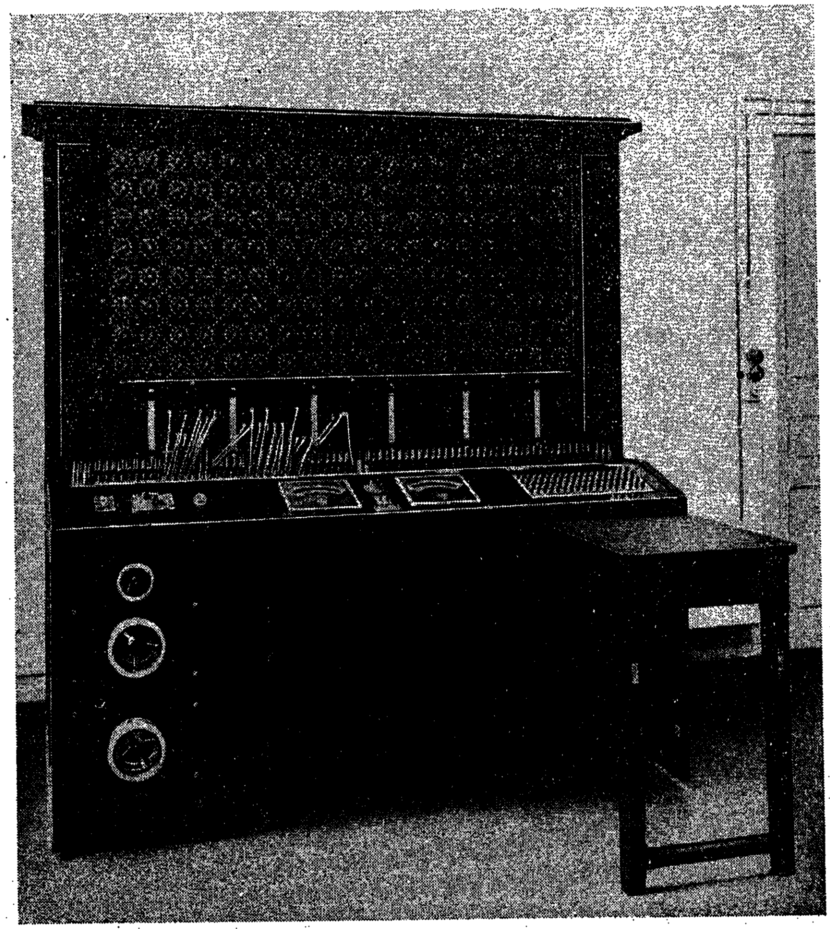


Fig. 2. — Vue d'ensemble de la table de calcul.

Les diverses résistances ont été étudiées en vue de supporter indéfiniment le courant maximum susceptible de les traverser et de présenter un coefficient de variation de résistivité pratiquement nul entre la température ambiante et leur température de régime. La tolérance de construction admise sur la valeur des éléments était de ± 1 pour cent, mais l'étalonnage effectué sur chacun d'eux a révélé des écarts bien inférieurs à ce chiffre.

V. — Utilisation de la table de calcul électrique

D'après les indications données précédemment (paragraphe II), le calcul d'un courant de court-circuit quelconque, par la méthode des coordonnées symétriques, se ramène à la détermination des réactances totales équivalentes, dans les systèmes direct, inverse et monophasé, de tous les circuits en parallèle aboutissant au défaut.

Cette mesure s'effectue sur la table de calcul, dans un quelconque des systèmes, de la manière suivante.

Les réactances de chacun des éléments du réseau ayant été calculées au préalable en ohms et ramenées à une tension de référence unique (qui sera, en général la tension de service la plus élevée existant sur le réseau), on détermine pour chacune d'elles la valeur de la résistance figurative en la multipliant par un coefficient convenablement choisi pour obtenir des lectures lisibles sur le milliampèremètre.

On prépare sur la table le réseau figuratif en donnant aux résistances les valeurs résultant du calcul précédent. On établit le court-circuit en introduisant la fiche négative à l'endroit du défaut présumé et on lit sur le milliampèremètre le courant total, le courant traversant les circuits aboutissant au défaut et, s'il y a lieu, le courant dans un élément quelconque.

Soit i le courant total mesuré, i_1, i_2, i_3, etc... les courants dans les branches aboutissant au défaut, i'_{11}, i'_{12}, i'_{13} etc... les courants dans des branches quelconques, s la réactance totale équivalente du réseau, s_1, s_2, s_3... etc ; les réactances équivalentes de chaque branche, k le coefficient de transformation des réactances, u la tension appliquée à la table.

Les réactances équivalentes totales et partielles des circuits aboutissant au défaut sont respectivement :

$$s = \frac{u}{ki},$$

$$s_1 = \frac{u}{ki_1},$$

$$s_2 = \frac{u}{ki_2},$$

$$s_3 = \frac{u}{ki_3}.$$

Les coefficients intervenant dans le calcul des composantes du courant de court-circuit dans une branche quelconque ont pour valeur :

$$\frac{i'_{11}}{i}, \quad \frac{i'_{12}}{i}, \quad \frac{i'_{13}}{i}, \quad \ldots\ldots \text{ etc.}$$

Cette détermination, effectuée successivement dans chacun des systèmes direct, inverse et monophasé, donne tous les éléments permettant ensuite d'obtenir, par l'application de formules très simples, les valeurs de courants de court-circuit instantanés ou permanents, symétriques ou dissymétriques.

Lorsqu'il est nécessaire, en vue de l'étude d'un défaut dissymétrique, de mesurer les réactances des trois systèmes, on commence par représenter, par exemple, les réactances directes et l'on effectue les mesures. Sans toucher au schéma du réseau figuratif, on modifie ensuite les résistances correspondant aux seuls éléments (machines synchrones ou asynchrones) dont les réactances inverses diffèrent des réactances directes et l'on procède à de nouvelles mesures. Enfin, l'on représente le réseau des réactances monophasées, qui est, en général, beaucoup plus simple que le précédent en raison de la limitation du nombre de mises à la terre du point neutre.

Les modifications à apporter au réseau figuratif pour l'étude successive des trois systèmes sont donc peu importantes.

Dans le cas particulier où l'on veut se borner à la détermination du courant de court-circuit triphasé, on représente sur la table les réactances inverses ou directes, selon qu'il s'agit du court-circuit initial ou permanent. Si l'on admet que les forces électromotrices se conservent après l'établissement du court-circuit, il suffira de multiplier par un coefficient de transformation convenable l'intensité totale lue sur la table pour obtenir directement la valeur du courant de court-circuit total.

De même, on obtiendra le courant dans une branche quelconque en multipliant par le coefficient l'intensité relevée sur la table et en le majorant vectoriellement du courant normal préexistant dans cette branche.

Soit U la tension simple normale du réseau, u la tension appliquée à la table, K le coefficient de transformation des réactances. Le coefficient de transformation des intensités est égal à $\frac{KU}{u}$.

Si les forces électromotrices ne se conservent pas, il y a lieu d'en tenir compte dans le calcul des courants total et partiels.

Lorsqu'on veut étudier les répercussions que peuvent exercer, sur la valeur des courants de défaut, certaines modifications apportées aux caractéristiques du réseau, il est aisé de le faire sans changer la consistance générale du réseau figuratif.

Par exemple, la coupure d'une ligne ou d'une interconnexion, la

suppression d'une centrale, se réalisent instantanément en manœuvrant la clef de coupure des éléments qui les représentent.

Le doublement d'une ligne, de même que l'opération inverse, la modification de puissance d'une centrale ou d'un poste de transformation, s'opèrent simplement en agissant sur la valeur de leurs résistances figuratives.

On peut étudier de même l'influence exercée sur la valeur du courant de défaut à la terre par l'augmentation ou la réduction du nombre de mises à la terre du neutre d'un réseau, ou par l'insertion de réactances dans les connexions de neutre. On peut, en ce dernier cas, faire varier leur valeur et choisir celle qui s'adapte le mieux aux conditions générales d'exploitation du réseau.

On peut de la même façon, déterminer les caractéristiques des réactances montées en série avec les lignes, ou entre deux réseaux interconnectés, en vue de réduire l'importance du courant de court-circuit.

En créant successivement des défauts en divers points du réseau, ce qui ne nécessite que le déplacement de la fiche négative, on peut, enfin, déterminer dans tous ces points la valeur des courants de court-circuit qui interviennent, par exemple, dans le choix des interrupteurs et dans la détermination du calibre et de la sensibilité des relais de protection.

VI. — Conclusions

Nous nous sommes efforcés de démontrer les services que pouvait rendre la table de calcul des courants de court-circuit dont nous avons donné la description.

Les avantages que présente son emploi par rapport à celui des méthodes purement mathématiques sont très importants et nous les récapitulerons ci-après :

Les opérations nécessaires à la détermination des courants de court-circuit se trouvent considérablement réduites, dès que le réseau étudié présente une certaine complexité.

Cet avantage est particulièrement sensible dans le cas de réseaux bouclés ou maillés, dont l'étude mathématique nécessite des calculs toujours très longs et pénibles, parfois même pratiquement irréalisables.

La table permet, d'autre part, de faire varier à volonté les caractéristiques des éléments d'un réseau, ainsi que sa configuration schématique et de déplacer l'endroit du défaut ; les manœuvres et lectures né-

cessaires sont très simples et s'effectuent presque instantanément sans donner lieu à des calculs nouveaux.

Il en résulte une économie de temps très considérable par rapport aux méthodes purement mathématiques pour lesquelles chaque cas particulier nécessite un nouveau calcul.

L'emploi de la table permet, en résumé, non seulement de mener à bien une étude déterminée dans un temps beaucoup plus réduit que le calcul, mais encore de pousser bien plus loin, grâce à sa rapidité et à sa simplicité de manœuvre, l'étude systématique et rationnelle des conditions de fonctionnement d'un réseau au moment d'un défaut.

LA TRANSMISSION RADIOTÉLÉPHONIQUE A ONDES COURTES A BANDE LATÉRALE UNIQUE ET AUTRES SYSTÈMES (1)

Par E. M. DELORAINE

Directeur des Laboratoires L. M. T.

SOMMAIRE ANALYTIQUE

---

(1) Cette communication, présentée à la séance du 8 janvier 1932, de la 5e Section, sous la présidence de M. MILON, sera discutée pendant la semaine de Discussions de novembre 1932.

I. — Introduction

A l'origine les radio-communications étaient exclusivement télégraphiques. En 1898, on avait encore besoin de codes artificiels pour transmettre la pensée par ondes hertziennes, ne serait-ce que de part et d'autre la Manche.

17 ans plus tard, en 1915, il est possible de parler sans code artificiel, directement, mais péniblement, d'Arlington à Paris.

Encore dix ans et, en 1925, nous nous trouvons capables d'échanger commercialement entre New-York et Rugby des conversations radiotéléphoniques Duplex, par la méthode de la bande latérale unique appliquée aux ondes longues.

Enfin, une dernière période de six années s'écoule et, en 1931, des expériences concluantes établissent la possibilité de transmettre directement la parole sur liaisons radio-téléphoniques à grande distance, par la méthode de la bande latérale unique appliquée aux ondes courtes.

Si ces progrès ainsi réalisés au cours de 33 années furent considérables, ils furent aussi de moins en moins frappants pour le grand public, puis pour les techniciens eux-mêmes, aussi avons-nous pensé qu'il serait intéressant de les mettre en évidence dans un travail d'ensemble en insistant spécialement sur leurs étapes récentes.

2. — Généralités sur les courants modulés.

Avant de décrire et de comparer les diverses méthodes radiotéléphoniques utilisées commercialement ou simplement préconisées, il convient de préciser certains termes quelquefois mal interprétés.

2.1 *Définition et propriétés des bandes latérales et du courant porteur.*

Considérons, (fig. 1*a*) un courant alternatif sinusoïdal de fréquence absolument constante $\frac{P}{2\pi}$, mais dont l'amplitude varie sinusoïdalement en fonction du temps à une fréquence $\frac{M}{2\pi}$, évidemment inférieure à $\frac{P}{2\pi}$ (fig. 1*b*). Un tel courant — appelé courant modulé — est représenté par l'équation (1) :

$$i = I_0(1 + K \cos Mt) \sin Pt \qquad \text{avec } M < P \tag{1}$$

dans laquelle, par définition, I_0 représente l'amplitude du courant en l'absence de modulation ($K = 0$) et K la profondeur de modulation représentée sur la figure 1 par le quotient $\frac{CD}{AB}$.

Cos Mt variant entre + 1 et — 1, on voit de suite que l'amplitude du courant de pulsation P varie, à la pulsation M, entre les valeurs I_{max} et I_{min} suivantes :

(2) $$I_{max} = (1 + K)I_0$$

(3) $$I_{min} = (1 - K)I_0$$

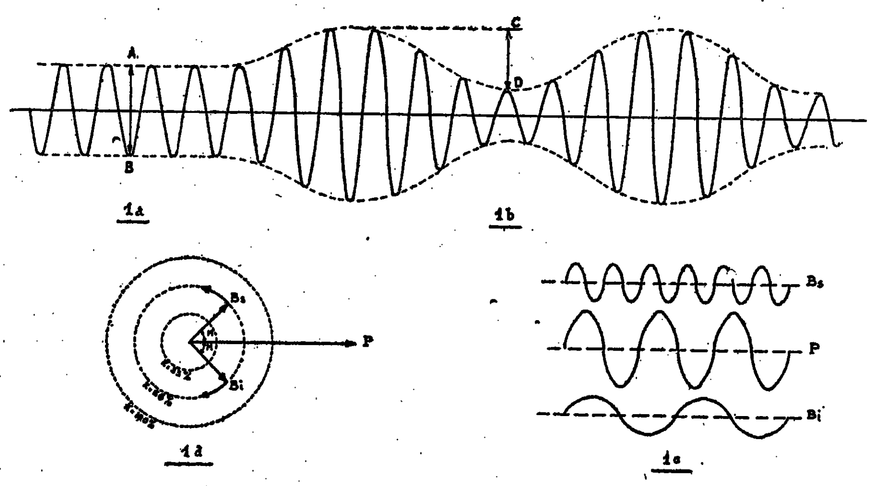


Fig. 1.

Trigonométriquement, l'équation (1) est *rigoureusement équivalente* à l'équation (4) :

(4) $$i = I_0 \sin Pt + \frac{K}{2} I_0 \sin B_s t + \frac{K}{2} I_0 \sin B_i t$$

dans laquelle, pour alléger les notations, on a posé :

(5) $$B_s = P + M$$

(6) $$B_i = P - M.$$

L'intérêt de cette transformation mathématique est de faciliter l'étude du courant complexe *non sinusoïdal* de l'équation (1) en l'assimilant rigoureusement à une somme de 3 courants *purement sinusoïdaux* représentés par l'équation (4).

Le premier terme $I_0 \sin Pt$ de cette somme est appelé courant porteur.

Le second, $\frac{K}{2}$ $I_0 \sin B_s t$, est appelé le courant de bande supérieure.

Et le troisième, $\frac{K}{2}$ $I_0 \sin B_i t$, le courant de bande inférieure.

L'analyse du courant i représenté par l'équation (4) permet de voir immédiatement que :

a) le circuit ou le milieu destiné à transporter un courant modulé doit être considéré pour 3 fréquences :

la fréquence du porteur $\frac{P}{2\pi}$:

la fréquence de bande supérieure $\frac{B_s}{2\pi}$, égale à la somme des fréquences porteuse et modulante ;

la fréquence de bande inférieure $\frac{B_i}{2\pi}$, égale à la différence des fréquences porteuse et modulante.

Un courant modulé se représente donc, vectoriellement, par la somme géométrique des 3 vecteurs P, B_i et B_s de la figure 1*d*, évitant la somme arithmétique des 3 sinusoïdes de la figure 1*c*. Le vecteur P est fixe, alors que les deux vecteurs B_i et B_s tournent en sens inverse à la vitesse angulaire M, toute la figure tournant, bien entendu, à la vitesse angulaire P dans le sens de rotation de B_s (2).

Bien qu'il semble anormal de parler de déphasage de 2 sinusoïdes n'ayant pas la même période, la fig. 1 permet de se rendre compte que la phase du vecteur P ne peut être quelconque, mais que ce vecteur doit toujours se trouver dans la bissectrice de l'angle variable des vecteurs B_i et B_s. Le diamètre du cercle B_i B_s ne peut évidemment excéder $\frac{P}{2}$ (K = 1).

b) l'amplitude d'un courant de bande est au plus égale à la moitié de l'amplitude du courant porteur (K = 1), de sorte que la puissance

(2) Cette anomalie apparente est cependant conforme à la définition classique de la « phase » d'un courant alternatif $i = I_0 \sin(\omega t + \alpha)$. D'après P. Janet (*Leçons d'Electrotechnique générale*, tome II, page 4 de la 6e édition de 1926) la phase de ce courant i est la quantité sous le signe sin, c'est-à-dire $\omega t + \varphi$ et non φ. Il est donc parfaitement légitime — classiquement parlant — d'envisager les valeurs instantanées de la phase d'un courant alternatif ou d'assimiler — physiquement parlant — des variations de phase à des variations de fréquence. Si deux courants alternatifs sont de fréquences différentes, on peut de même — mathématiquement parlant — envisager la valeur instantanée de leur déphasage qui n'est plus alors une constante mais une fonction du temps de la forme $(\omega - \omega')t + (\varphi - \varphi')$.

dans chaque bande est au plus égale au 1/4 de la puissance dans le porteur lorsque le courant i traverse une résistance ou une impédance indépendante de la pulsation dans les limites B_1 à B_2.

c) La puissance moyenne P_{moy}, active ou réactive, provoquée par le passage du courant modulé i à travers une résistance ou impédance constante, est égale à la puissance p du courant porteur augmentée de deux fois la puissance P_B d'une bande.

$$(7) \qquad P_B = \frac{K^2}{4} p$$

c'est-à-dire que :

$$(8) \qquad P_{moy} = p\left(1 + \frac{K^2}{2}\right).$$

Il s'agit là évidemment de la puissance moyenne pendant un nombre entier de périodes de modulation $\frac{2\pi}{M}$. Cette puissance varie à la fréquence $\frac{M}{2\pi}$ entre une puissance de crête P_{max} et une puissance de creux P_{min} dont les valeurs en fonction de la puissance p du porteur sont données par les équations suivantes :

$$(9) \qquad P_{max} = p\,(1 + K)^2$$

$$(10) \qquad P_{min} = p\,(1 - K)^2.$$

Ces valeurs de P_{max} et de P_{min} se déduisent immédiatement des valeurs maximum et minimum de l'amplitude de i tirées des équations (2) et (3).

Dans le cas particulier d'une profondeur de modulation de 100 pour cent ($K = 1$), on voit donc que la puissance au cours d'une période de modulation $\frac{2\pi}{M}$ varie entre 0 et 4 fois la puissance du porteur, alors que la puissance moyenne n'atteint que 1,5 fois la puissance du porteur. Il s'en suit que dans un poste de radio-diffusion la valeur efficace du courant d'antenne ne croît que dans la proportion de 1 à $\sqrt{1{,}5}$, soit de 22,5 pour cent lorsque, après une pause, le chanteur *soutient* une forte note de longue durée. Lors des fluctuations normales de puissance de la parole, ce courant d'antenne, mesuré par un thermique ou un couple à grande constante de temps, ne semble varier que de quelques pour cent.

d) Calculons la chaleur Q produite par seconde par le passage du courant i de l'équation (4) dans une résistance R.

$$(11) \qquad Q = Ri^2 = \frac{RI^2_0}{2}\left(1 + \frac{K^2}{2}\right)$$
$$- \frac{RI^2_0}{2}\left(\cos 2Pt + \frac{K^2}{4}\cos 2B_s t + \frac{K^2}{4}\cos 2B_i t\right)$$
$$- \frac{RI^2_0}{2}\left(K\cos(P + B_s)t + K\cos(P + B_i)t + \frac{K^2}{2}\cos(B_i + B_s)t\right)$$
$$+ KRI^2_0\left(\cos Mt + \frac{K}{4}\cos 2Mt\right).$$

En plus du terme constant et des harmoniques éventuels, on voit donc apparaître sept fréquences différentes ($B_i + B_s = 2P$) dans l'expression de la chaleur dégagée par seconde par un radiateur électrique alimenté par du courant alternatif modulé. Le terme constant, le seul dont la valeur moyenne n'est pas nulle, représente bien la chaleur dégagée par seconde par le courant porteur et chacune des 2 bandes.

Cette formule (11), appliquée au fonctionnement des détecteurs à caractéristique parabolique, sera utile pour l'étude de la distorsion de la parole et du fonctionnement des régulateurs automatiques de gain des amplificateurs.

La transformation de l'équation du courant modulé de la formule (1) à la formule (4) se révèle donc particulièrement commode pour l'analyse des phénomènes où de tels courants entrent en jeu. Nous l'emploierons donc dans le reste de cet exposé.

Dès qu'il y a variation périodique de l'intensité efficace d'un courant alternatif, on peut donc dire qu'il y a production de bandes latérales qui se superposent au courant porteur. Alimentons par ex une lampe d'éclairage de 100 W par un secteur 110 V/50 p:s par l'intermédiaire d'un interrupteur thermique réglé pour ouvrir et fermer le circuit une fois par seconde. La puissance moyenne dissipée dans la lampe ne sera plus que de 50 W, et on montre que cette puissance peut être considérée comme produite par trois courants respectivement à 49,50 et 51 p:s sans compter leurs harmoniques dus au système rudimentaire de modulation rectangulaire employé.

Dans cet exemple, même si l'interrupteur thermique restait fermé, la puissance instantanée de pointe atteindrait 200 W, ce qui ne manquerait pas de griller la lampe si la fréquence de l'onde porteuse, la seule imposée par le secteur de distribution, était beaucoup plus faible que 50 p:s.

C'est à dessein que, dans l'exposé ci-dessus, on a employé le terme général de *bande latérale*. En réalité, il ne s'agissait jusqu'à présent

que de *fréquences latérales*, c'est-à-dire de 2 raies bilatérales déterminées. Cependant le plus souvent, dans la pratique, le courant modulant n'est pas un simple courant sinusoïdal, mais un courant de

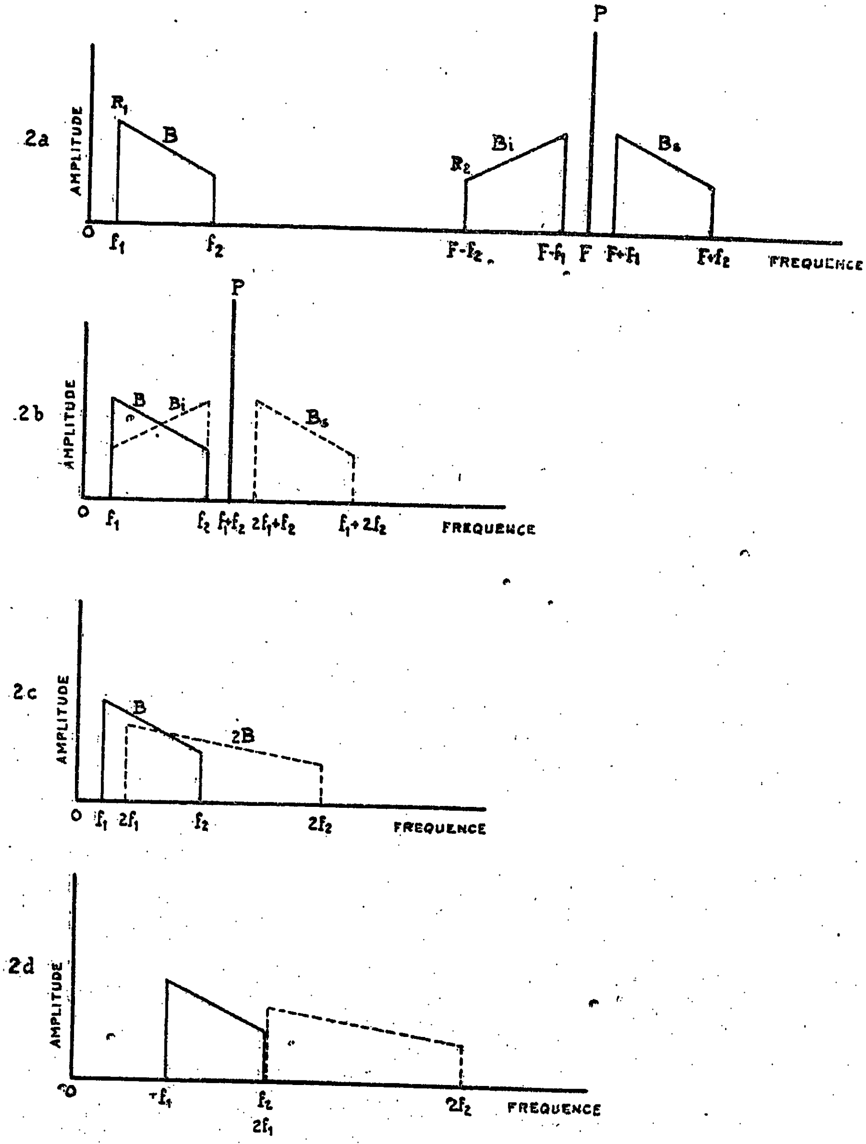


Fig 2.

forme complexe caractérisant la parole transmise. Dans ce cas, on trouve de chaque côté de la fréquence porteuse, non plus deux raies bilatérales, symétriques, mais des spectres latéraux dont chacun renferme, à un instant donné, toutes les raies caractéristiques du son

transmis. Ces raies correspondent aux nombreux harmoniques du son fondamental caractérisant le timbre de la parole et la façon dont les sons fondamentaux des différentes voyelles sont modifiés par les diverses consonnes adjacentes.

En téléphonie, la constitution intime de ces spectres latéraux varie donc à chaque instant, aussi désigne-t-on sous la *dénomination générale de bande latérale*, l'ensemble des raies latérales correspondant à l'émission, soit d'un son simple (pur ou accompagné d'harmoniques) comme celui d'un diapason, soit de spectres latéraux discontinus mais fixes, correspondant à un accord bien défini, soit enfin des spectres latéraux variables plus ou moins éphémères en ce qui concerne les consonnes caractérisant la parole humaine et ayant l'apparence de spectres latéraux continus.

La figure 2*a* représente un courant porteur P situé entre ses deux bandes latérales B_i et B_s ; les fréquences sont portées en abscisses et les amplitudes en ordonnées, ces dernières suivant des lois absolument arbitraires, la figure n'ayant d'autre prétention que de caractériser deux bandes latérales de forme particulière.

2.2 *Augmentation, réduction ou suppression du courant porteur.*

L'équation (4) montre que, pour supprimer le courant porteur, il suffit d'introduire dans le circuit une force électromotrice y provoquant un courant $-I_0 \sin Pt$.

Cela est très réalisable, puisque cette force électromotrice auxiliaire est d'amplitude, de fréquence et de phase constantes ; l'électrotechnique usuelle fournit de nombreux moyens de réalisation.

Si l'on désire simplement réduire le porteur sans l'annuler, il suffit que l'amplitude de cette force électro-motrice auxiliaire provoque un courant plus faible que I_0, mais toujours en opposition de phase. Au contraire, pour augmenter l'amplitude du porteur, cette force électromotrice auxiliaire peut être d'amplitude quelconque, à condition cependant d'ajouter un courant toujours en phase avec $I_0 \sin Pt$. Il ne saurait être question d'introduire dans le circuit une force électromotrice auxiliaire qui ne serait pas, soit en phase, soit en opposition de phase avec le porteur. Dans ce cas, en effet, les valeurs instantanées des phases des deux bandes ne seraient plus égales et de signes contraires par rapport à la phase du porteur *résultant* comme il a été dit plus haut à propos de la fig. 1*d*. (En toute rigueur, comme les fréquences sont différentes, il faudrait parler de la phase des deux

courants basse fréquence produits par le battement détecté de chaque bande avec la moitié de l'onde porteuse. La notion classique de valeur instantanée des déphasages, définie par les angles M de la figure 1*d*, permet de simplifier le langage).

Un des moyens les plus simples de réaliser les combinaisons ci-dessus préconisées est le suivant :

Considérons le modulateur HEISING dit à courant constant, ce modulateur est, en fait, un amplificateur haute fréquence, classe 3 (3), dont l'excitation de grille de pulsation P est constante en amplitude et dont la tension plaque est constituée par l'addition d'une force électromotrice continue et d'une force électromotrice alternative de pulsation M. Le rapport de ces deux forces électromotrices permet de régler à volonté la profondeur de modulation entre 0 et 1. La formule (8) indique que le rapport des puissances fournies par ces deux sources de tension anodique est de $\frac{K^2}{2}$. Si ρ représente le rendement anodique du modulateur, on voit donc que la puissance basse fréquence P_{BF}, de pulsation M, à fournir au modulateur, est égale à la puissance du porteur multipliée par $\frac{K^2}{2\rho}$.

Exemple : Un porteur de 1 kW fourni par un oscillateur à bon rendement ($\rho = 70$ pour cent) sera modulé à 60 pour cent par une puissance basse fréquence de 257 W seulement. Le même porteur de 1 kW, modulé à 100 pour cent, nécessitera une puissance basse fréquence de 714 W. En modifiant la puissance basse fréquence fournie à l'oscillateur, on peut donc augmenter ou diminuer à volonté l'amplitude relative du courant porteur.

Pour supprimer complètement le courant porteur, un moyen simple consiste à monter en différentiel deux modulateurs bien équilibrés du type HEISING précédemment décrit. On s'arrangera pour que les deux courants porteurs de pulsation P soient exactement en opposition de phase et s'annulent dans le circuit de sortie.

Au contraire, les phases des courants modulants de pulsations M seront telles que le courant modulé fourni par le premier modulateur

(3) Un amplificateur travaillant en classe I est un amplificateur dans lequel le point caractérisé par ses 3 coordonnées (valeurs instantanées du courant plaque, de la tension plaque et de la tension grille) ne quitte pas la partie rigoureusement plane de la surface caractéristique dynamique des tubes utilisés. Au contraire, un amplificateur travaillant en classe 3, utilise les parties de la surface caractéristique dynamique des tubes dans lesquelles le courant plaque reste nul ou fonction non linéaire de la tension anodique résultante $V_p + \mu V_g$.

atteint sa valeur de crête lorsque précisément le courant modulé fourni par le modulateur n° 2 passe par sa valeur de creux. Le résultat sera donc la production d'un courant modulé, sans courant porteur, c'est-à-dire la production des deux bandes latérales seules, la figure 3 indique le schéma de principe d'un tel modulateur différentiel d'un type particulier qui sera désigné dans ce qui va suivre sous le nom de modulateur équilibré. En réalité, cette figure est une variante du dispositif décrit ci-dessus utilisant la modulation grille et non pas la modu-

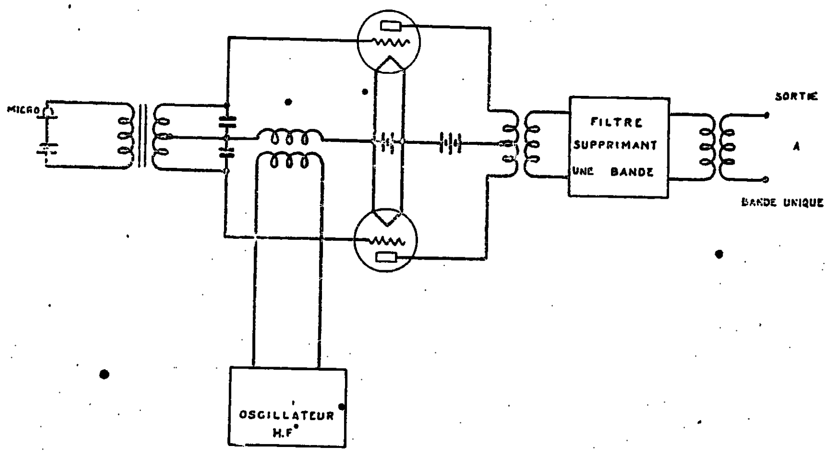


Fig. 3. — Transmission d'une bande unique; modulateur équilibré.

lation HEISING. Cette figure 3 représente le modulateur équilibré CARSON et non le modulateur différentiel HEISING.

2.3 *Séparation, écartement ou retournement des bandes latérales.*

Le modulateur équilibré décrit ci-dessus permet de supprimer le porteur ou, plus exactement, de réduire son amplitude de 10, 20 ou 30 décibels selon la précision de l'équilibre obtenu. Pour isoler l'une des deux bandes latérales, il suffit maintenant de disposer d'un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure soit très près de la plus haute fréquence de la bande inférieure ou d'un filtre passe-haut dont la fréquence de coupure soit très près de la plus basse fréquence de la bande supérieure. En pratique, si l'on désire isoler, par exemple, la bande supérieure, on placera la fréquence de coupure du filtre passe-haut utilisé entre la plus basse fréquence de la bande supérieure et la fréquence du porteur. De cette façon, le filtre réduira lui-même, si nécessaire, le peu de courant porteur qu'aurait pu transmettre un modulateur différentiel mal équilibré. Il est bien entendu que la réalisa-

tion des filtres passe-bas ou passe-haut nécessaires sera d'autant plus facile que la différence entre la plus basse fréquence de la bande supérieure et la plus haute fréquence de la bande inférieure sera grande, non pas en valeur absolue, mais seulement vis-à-vis de la fréquence du porteur supprimé. C'est pourquoi, en pratique, la séparation des bandes latérales téléphoniques (300 à 3 000 p:s) se fera après modulation d'un porteur de fréquence relativement faible, voisine de 20 000 p:s.

Dans ce cas, la distance séparant les deux bandes, évaluée en périodes par seconde et rapportée à la fréquence du porteur supprimé, est d'environ 3 pour cent.

L'exemple numérique ci-dessus est celui qui se présente couramment dans les systèmes de téléphonie à bande unique utilisant la propagation de courants à haute fréquence le long des fils. Dans le cas de fréquences hertziennes plus élevées, les deux bandes latérales sont beaucoup plus rapprochées relativement et il serait impossible de les séparer l'une de l'autre par des filtres passe-bas ou passe-haut ordinaires, d'un prix acceptable. Peut-être y parviendrait-on à l'aide de filtres utilisant le très faible amortissement de quartz piézo-électriques. Quoi qu'il en soit, il est plus simple, pour le moment, de procéder à l'écartement des bandes avant de procéder à leur séparation.

Exemple numérique :

Considérons la bande téléphonique commerciale de 0,3 à 3 kp:s que nous désirons déplacer dans le spectre de fréquences électromagnétiques jusqu'à l'amener dans la zone 100,3 à 103 kp:s.

La première solution déjà envisagée ci-dessus consiste à moduler un porteur auxiliaire de 100 kp:s par la bande 0,3 à 3 kp:s et à éliminer le porteur après usage par un modulateur équilibré. Il nous restera les deux bandes 97 à 99,7 et 100,3 à 103 kp:s qu'il sera bien difficile de séparer à cause de la proximité relative de leurs frontières internes 99,7 et 100,3 kp:s (0,6 pour cent).

Au lieu de cela, modulons tout d'abord un premier porteur auxiliaire à 20 kp:s et isolons la bande 20,3 à 23 kp:s comme indiqué ci-dessus. Modulons ensuite à l'aide d'un autre modulateur équilibré un deuxième porteur auxiliaire à 80 kp:s par cette bande 20,3 à 23 kp:s. Nous obtenons les deux bandes 57 à 59,7 et 100,3 à 103 kp:s dont les frontières internes 63 et 100,3 sont beaucoup plus *écartées* que précédemment (50 pour cent). Ayant ainsi *écarté* les bandes latérales,

il est maintenant facile de les *séparer* si on désire isoler la bande 100,3 à 103 kp:s.

Le procédé peut évidemment se généraliser en procédant à $(n - 1)$ écartements par n porteurs auxiliaires, tous éliminés après usage.

Un autre avantage des grands écartements de l'ordre de 50 pour cent comme ci-dessus est de permettre au transmetteur de changer de longueur d'onde sans devoir modifier les filtres utilisés. Sans cela, il faudrait réaliser des filtres non seulement à frontières abruptes mais encore à frontières variables.

A ce propos signalons de suite que le système REEVES de récepteur synchronisé permet de réaliser des filtres à bande passante étroite de largeur constante, mais à frontières variables.

En résumé, l'artifice des modulations successives par porteurs auxiliaires et l'emploi de modulateurs équilibrés permettent, soit *d'écarter* deux bandes latérales, soit, ce qui revient au même, de *déplacer* et d'isoler une bande latérale unique vers les régions à très haute fréquence du spectre des oscillations électromagnétiques.

Si, au lieu d'éliminer la bande inférieure pour ne garder que la bande supérieure, nous avions, au contraire, utilisé la bande inférieure, nous aurions pu, soit *rapprocher* deux bandes latérales, soit *replacer* une bande latérale haute fréquence dans les régions à basse fréquence du spectre des oscillations électromagnétiques. En réalité, les deux opérations ne sont pas rigoureusement identiques. Si l'on examine les signes de M dans les équations (5) et (6), ou encore l'aspect de la figure 2*a*, on voit que la bande supérieure est déplacée par translation du spectre dans le sens des fréquences croissantes, tandis que la bande inférieure a été *retournée* avant d'être déplacée. Tout se passe comme si la bande inférieure s'obtenait par rotation du plan de la bande supérieure autour de la raie porteuse comme charnière. Autrement dit les sons les plus aigus de la bande initiale, avant écartement, correspondent aux fréquences les plus élevées dans la bande supérieure mais aux plus basses dans la bande inférieure.

Pour écarter une bande téléphonique originelle vers les régions à haute fréquence du spectre hertzien, les procédés ci-dessus consistent à transformer la bande unique originelle en un système comprenant un porteur auxiliaire et deux bandes bilatérales, à éliminer le porteur après usage, puis à écarter les deux bandes bilatérales de manière à pouvoir les filtrer et n'en conserver qu'une.

Il serait évidemment plus rationnel de produire directement la bande unique hertzienne désirée par un déplacement pur et simple de la bande unique téléphonique originelle.

Le problème consiste à ajouter une fréquence fixe F à toutes les fréquences d'un spectre vocal $f_1 — f_2$.

Une première solution consiste à asservir la fréquence F d'un oscillateur à la fréquence f à déplacer ($f_1 < f < f_2$). On imagine facilement qu'une raie de fréquence f pourrait agir, d'une manière caractérisant la fréquence de la raie, sur la température d'un quartz, la saturation d'un noyau de fer ou la résistance R_1 des figures 6*a* ou 6*b* (qui, nous le verrons plus loin, asservit précisément la fréquence d'un oscillateur) de manière à provoquer une augmentation f de la fréquence F ou même une diminution f de F si l'on désire à la fois déplacer et inverser. Par ailleurs, un autre appareil pourrait asservir l'amplitude du courant de fréquence F à l'amplitude du courant de fréquence f.

En fait, cette solution a déjà été appliquée en télégraphie, par exemple, dans les anciens postes à arc, où la manipulation agissait sur la fréquence du courant d'antenne et non sur son amplitude.

Par court-circuitage d'une fraction de la self du circuit oscillant, on réalisait ainsi un système de transmission à porteur intermittent et à bande latérale unique alors que le système ordinaire de manipulation sur l'amplitude utilise un porteur et deux bandes bilatérales télégraphiques d'un certain nombre de bauds fonction du code et de la vitesse de manipulation.

Une seconde solution du problème proposée par M. BUSIGNIES en 1928 consiste à exploiter la relation trigonométrique bien connue

$$\text{(11 bis)} \qquad \sin(F + f) = \sin F \cos f + \cos F \sin f$$

qui montre que, pour ajouter une fréquence fixe F à une bande caractérisée par la raie f, il suffit de faire la somme de deux courants modulés sans porteur respectivement proportionnels à $\cos F \sin f$ et à $\cos F \sin f$, c'est-à-dire en somme à connecter en série les deux enroulements d'un *oscillateur diphasé* de fréquence F dont les 2 phases seraient respectivement modulées par des courants modulants également diphasés.

La relation (11 *bis*) engendre ainsi *directement* une raie latérale unique supérieure.

Pour engendrer la raie latérale unique inférieure, il suffit évidemment de changer f en $-f$ dans la formule (11 bis). Seul, le deuxième terme du deuxième membre change de signe, ce qui montre que le

procédé permet de passer élégamment de la raie latérale supérieure à la raie latérale inférieure par simple inversion de l'un des enroulements diphasés.

En réalité, les deux solutions ci-dessus et surtout la première rencontrent des difficultés d'application dès que l'on veut moduler le porteur, non plus par une fréquence unique, (comme en télégraphie modulée à raie latérale unique), mais simultanément par plusieurs raies d'un même spectre discontinu ou surtout d'un spectre à raies mobiles semblable à un spectre continu (comme en téléphonie à bande latérale unique).

Nous verrons plus loin qu'une difficulté analogue se présente dès que l'on veut doubler une bande avec un doubleur de fréquence même apériodique.

Cette difficulté semble partiellement insurmontable à l'heure actuelle.

2.4 *Valeurs particulières de courants porteurs auxiliaires.*

Le spectre représenté sur la figure 2*a* nous montre une certaine bande de fréquence B comprise entre la fréquence f_1 et la fréquence f_2, dont la translation en B_s a été obtenue par l'addition à toutes les fréquences de la bande B de la fréquence F d'un courant porteur P. Sur la figure 2*a*, on trouve la bande inférieure B*i* correspondant à une translation accompagnée d'un retournement de la bande B autour de P comme charnière. Il est bien évident que les positions relatives de ces 3 bandes dépendent exclusivement des positions des raies f_1, f_2 et F par rapport à la raie O représentant la fréquence O, c'est-à-dire la limite inférieure du spectre.

2.4.1. *Bandes inversées.*

Si l'on veut que la bande B_i (fig. 2*a*) vienne se superposer et occuper la même place que la bande B, il suffit que les abscisses des raies R_1 et R_2 soient égales, c'est-à-dire que :

(12) $f_1 = F - f_2$ ou

(13) $F = f_1 + f_2$

donc pour inverser une bande, il suffit de choisir un courant porteur auxiliaire dont la fréquence soit égale à la somme des fréquences frontières de la dite bande et de choisir la bande latérale inférieure après

modulation. La figure 2*b* montre le cas particulier de la figure 2*a* satisfaisant à l'équation (13).

Après cette inversion, les sons graves sont remplacés par des sons aigus de fréquence complémentaire et vice versa. En réalité le modulateur Carson donne non seulement la voix inversée, mais aussi la voix directe qu'il serait impossible de séparer l'une de l'autre. Il faut prendre comme premier porteur auxiliaire au moins le double de la fréquence supérieure de la bande et faire l'opération en deux fois.

2.4.2 *Bandes anharmoniques.*

Supposons maintenant que les courants de la bande B soient assujettis à traverser un appareil quelconque (filtre, amplificateur, détecteur...) occasionnant une déformation de la bande passante $f_1 — f_2$ par la création ou l'exagération d'harmoniques de second ordre occupant la bande $2f_1 — 2f_2$. Il est clair (fig. 2*c*) que ces 2 bandes auront une partie commune et qu'il sera impossible d'éliminer ces harmoniques parasites au moyen de filtres, si f_2 est plus grand que $2f_1$. Dans ce cas, en effet, les harmoniques 2 des fréquences graves de la bande B restent compris à l'intérieur de la bande utile, étant moins aigus que les sons les plus aigus de la bande passante (partie commune des bandes B et 2B). Pour éviter cet inconvénient, il suffit que la fréquence frontière supérieure soit plus petite que 2 fois la fréquence frontière inférieure (fig. 2*d*). Cette condition sera réalisée par translation de la bande B en B_s (fig. 2*a*) si

$$2(F + f_1) \geqslant F + f_2 \qquad \text{ou :}$$

(14) $$F \geqslant f_2 — 2f_1$$

donc, pour éviter la distorsion harmonique d'une bande, il suffit de rendre cette bande anharmonique en choisissant en principe un porteur auxiliaire de fréquence au moins égale à la fréquence de la frontière supérieure moins 2 fois la fréquence de la frontière inférieure de la bande et de ne conserver que la bande latérale supérieure après modulation. Si l'on voulait rendre la bande à la fois anharmonique et retournée, il suffirait de choisir la bande latérale inférieure et un porteur de fréquence F telle que :

(15) $$F \geqslant 2f_2 — f_1$$

En réalité, pour les raisons déjà indiquées, on fait l'opération par 2 modulations successives, chaque fois que l'appareil utilisé transmet la bande passante au lieu de la moduler exclusivement.

Remarquons enfin que, non seulement une bande anharmonique ne contient pas d'harmoniques 2, par définition, mais qu'elle ne peut pas — *a fortiori* — contenir d'harmoniques d'ordre supérieur. Elle ne peut pas non plus contenir *de produits d'intermodulation*, car la somme des fréquences de deux raies quelconques r_1 et r_2 étant toujours supérieure au double de la fréquence de la raie la plus grave, est évidemment extérieure à la bande.

En effet :

(14 *bis*) $$r_1 + r_2 > 2(F + f_1) \geqslant F + f_2.$$

La dernière inégalité est déduite de l'inégalité (14) ; $F + f_2$ représente bien la fréquence frontière supérieure de la bande.

De même, la différence des fréquences des 2 raies r_1 et r_2 étant évidemment inférieure à la largeur de la bande $(f_2 - f_1)$ est toujours plus petite que la fréquence frontière inférieure $F + f_1$, puisque la relation (14) peut encore s'écrire :

(14 *ter*) $$r_2 - r_1 < f_2 - f_1 \leqslant F + f_1.$$

Les relations (14 *bis*) et (14 *ter*) expriment bien qu'une bande anharmonique traversant un appareil à caractéristique non linéaire ne peut produire, ni harmoniques de rang quelconque, ni produits d'intermodulation. De telles bandes conviennent parfaitement à l'amplification simultanée de plusieurs fréquences par un seul amplificateur même non linéaire, ce qui permet d'utiliser des montages réflex ou des multicommunications avec des amplificateurs économiques travaillant en classe 3.

3. — Méthodes de transmission radiotéléphonique.

Ne sont examinées ci-dessous que les méthodes dérivant des procédés de modulation affectant directement l'amplitude du courant porteur, à l'exclusion des procédés affectant directement la fréquence ou la phase du courant porteur. Les premiers procédés qui sont caractérisés par l'équation (1), ont fait l'objet du paragraphe (2) précédent :

(1) $$i = A \sin Pt \quad \text{avec} \quad A = I_0\,(1 + K \cos Mt).$$

Les deuxième et troisième groupes de procédés exclus de cette étude seraient respectivement représentés par les équations (16) et (17) :

(16) $$i = I_0 \sin Pt \quad \text{avec} \quad P = f(Mt)$$

(17) $$i = I_0 \sin (Pt + \varphi) \quad \text{avec} \quad \varphi = f(Mt).$$

En réalité, tous les systèmes affectent au moins indirectement la fré-

quence des oscillations ou, *plus exactement*, la largeur l du spectre de fréquences occupé dans l'éther.

On démontre que la quantité d'intelligence Q_i transmise est proportionnelle au produit de la largeur de la bande occupée par la durée t de la transmission.

$$Q_i = klt. \tag{18}$$

Par exemple, une transmission télégraphique débitant 500 mots par minute, occupera la même place dans l'éther que 10 transmissions adjacentes débitant chacune 50 mots par minute à l'aide du même code.

Il y a lieu d'insister sur le fait que cette proposition générale n'est exacte que si le code utilisé est invariable. Autrement dit, le coefficient k de l'équation (18) est en réalité un critérium de la valeur du code utilisé.

A ce point de vue général, la téléphonie et les transmissions d'images animées ou inanimées ne sont que des codes plus ou moins perfectionnés, destinés à transmettre la pensée humaine. Les diverses langues sont des variantes de ces codes. La même idée transmise en anglais commercial occupera une place lt dans l'éther moins encombrante que si elle avait été transmise en français diplomatique. L'italien serait, paraît-il, plus avantageux encore (coefficient 3,9 au lieu de 2,8 pour l'anglais et 2,7 pour le français). La même phrase prononcée par une basse parlant rapidement encombrera moins l'éther que la même phrase prononcée par un soprano lent, pour la double raison que le premier utilisera des fréquences fondamentales plus faibles et parlera moins longtemps que le second. Une limite existe cependant dans ce genre d'économie par le fait que la plus courte des syllabes à transmettre doit contenir un nombre minimum de périodes correspondant aux sons les plus graves utilisés.

Examinons maintenant, dans l'ordre indiqué au sommaire, les différentes méthodes de transmission radiotéléphonique employées ou préconisées, faisant partie du premier groupe de procédés définis ci-dessus :

3.1 *Transmission permanente des deux bandes latérales et du porteur.*

3.1.1 *Bandes naturelles.*

Dans ce système, le courant dans l'antenne transmettrice est de la forme définie par l'équation (1) et représentée par les courbes des fig. 1*a* et 1*b*.

Ce système de transmission est le plus communément employé et aussi le plus ancien, parce que précisément aucun artifice n'intervient pour modifier l'onde modulée à sa sortie des modulateurs usuels et parce que les appareils de réception sont les plus simples, ce qui est très important dans beaucoup de cas et particulièrement pour la radio-diffusion.

Lorsqu'un courant sinusoïdal, $I_0 \sin Pt$, traverse une résistance fonction du temps, de la forme $1 + K \cos Mt$, la différence de potentiel aux bornes de cette résistance est *naturellement* de la forme représentée par les équations équivalentes (1) et (4). Il en est de même dans le modulateur thermoionique dont l'étude particulière sortirait du cadre de cette conférence.

3.1.1.1 *Profondeur de modulation forte ou faible*

La première question qui se pose est de savoir si l'on a intérêt à utiliser un porteur puissant modulé peu profondément, ou un porteur moins puissant modulé plus profondément. Nul doute que l'on a intérêt, au point de vue énergétique, à utiliser la profondeur de modulation maximum de 100 pour cent ($K = 1$) puisque seule la puissance dans les deux bandes, $2\,P_B$, est utile à la sortie d'un récepteur *muni d'un détecteur linéaire*.

En effet, des équations (7) et (8) on tire :

$$(19) \qquad 2P_B = P_{max} \frac{1}{2\left(1 + \frac{1}{K}\right)^2},$$

$$(20) \qquad 2P_B = P_{moy} \frac{1}{1 + \frac{2}{K^2}},$$

où, de toute évidence, la valeur maximum de la profondeur de modulation ($K = 1$) correspond à la valeur max. de la puissance des bandes $2\,P_B$, que le dernier étage du transmetteur soit limité par la puissance de crête P_{max} ou même par la puissance moyenne P_{moy}.

Si le récepteur est *muni d'un détecteur à caractéristique parabolique*, la puissance basse fréquence utile est proportionnelle au produit de l'amplitude des bandes par celle du porteur, c'est-à-dire à :

$$\sqrt{pP_B} = \frac{K}{2} p.$$

En développant cette expression par rapport à la puissance de crête du transmetteur, on trouve

$$\sqrt{pp_B} = \frac{P_{max}}{2} \cdot \frac{1}{\left(\sqrt{K} + \frac{1}{\sqrt{K}}\right)^2}.$$

Le produit des 2 termes du dénominateur étant constant, leur somme sera minimum pour

$$\sqrt{K} = \frac{1}{\sqrt{K}},$$

c'est-à-dire que la plus grande puissance utile correspondra également à K = 1. Si le transmetteur est limité par la puissance moyenne du dernier étage, on trouve

$$\sqrt{pp_B} = \frac{P_{moy}}{2} \times \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{K}{2}}.$$

Le produit des deux termes du dénominateur étant constant, la puissance utile sera maximum pour K = 1,414, de sorte que, pour éviter la nécessité d'une augmentation du porteur à la réception, on a également intérêt à adopter une profondeur de modulation de 100 pour cent dans les transmetteurs de cette dernière catégorie.

Deux autres avantages des grandes profondeurs de modulation sont, d'une part, de rendre plus négligeables les bruits de fond dus à la légère fluctuation des tensions d'alimentation redressées des transmetteurs ou des bruits de collecteurs et, d'autre part, de diminuer le bruit dans les récepteurs dû aux parasites, interférences, ou toute autre cause, car ce bruit, hétérodyné par l'onde porteuse, est d'autant plus faible que l'onde porteuse est plus réduite. Ceci dans le cas commercial d'une raie porteuse plus puissante que les raies parasites ambiantes. Dans le cas contraire, non commercial, le battement des raies parasites entre elles provoque un bruit constant qui s'ajoute à celui, variable avec la puissance du porteur, produit par le battement des raies parasites et de la raie porteuse, si le récepteur est du type superhétérodyne.

Quand le détecteur du récepteur est à caractéristique parabolique, on peut être tenté de croire que la puissance du porteur intervient plus utilement.

Considérons les termes à basse fréquence (en M et en 2M) de l'équation (11), laquelle représente un phénomène proportionnel au carré de l'intensité d'un courant modulé (effet Joule, détection parabolique...) :

(21) Partie utile du signal détecté :

$$KRI_0^2 \left(\cos Mt + \frac{K}{4} \cos 2\,Mt\right)$$

(21 *bis*) Partie utile du signal détecté :

$$R\left[I_0 \frac{KI_0}{2} \cos Mt + I_0 \frac{KI_0}{2} \cos Mt + \left(\frac{KI_0}{2}\right)^2 \cos 2Mt\right].$$

Sous la forme (21 *bis*) on voit que la partie utile du signal détecté se compose du battement à pulsation M de chaque bande d'amplitude $\frac{KI_0}{2}$, avec le porteur d'amplitude I_0 et d'un troisième terme représentant le battement à pulsation 2M des deux bandes entre elles. Ce troisième terme est une cause de distorsion, puisqu'il ajoute aux notes transmises les notes correspondantes de l'octave supérieur. Toutefois, l'amplitude de ce terme parasite est au plus le 1/4 de celle du terme utile pour $K = 1$. Cependant, pour des profondeurs de modulation moindres, ce terme parasite est plus petit encore, de sorte qu'une réduction de la profondeur de modulation améliore la qualité dans le cas d'une réception par détecteur à caractéristique parabolique. Or, pour les signaux faibles, les détecteurs usuels sont plutôt paraboliques que linéaires, de sorte qu'une augmentation du porteur améliore la qualité.

Les deux premiers termes de l'équation (21 *bis*) semblent indiquer que, pour une amplitude de bandes $\frac{KI_0}{2}$ déterminée, on aurait intérêt à accroître le porteur I_0 à la transmission ou à l'amplifier davantage que les bandes à la réception pour augmenter l'amplitude du produit de modulation correspondant. En réalité, il n'en est rien, car le bruit provoqué par le battement de l'onde porteuse avec les ondes parasites augmenterait dans la même proportion, de sorte que le rapport du signal au bruit ne serait pas amélioré, or seul ce rapport importe en l'occurence.

Tous facteurs étant pris en considération on peut conclure, surtout dans le cas des stations puissantes, et pour une puissance de crête donnée, qu'on a intérêt à adopter un pourcentage maximum de modulation élevé ; il en résulte, en particulier, une économie notable sur la puissance prélevée au réseau pour couvrir une surface déterminée.

3.1.1.2 *Profondeur de modulation variable ou constante*

La seconde question qui se pose à propos de l'utilisation du porteur accompagné de ses deux bandes naturelles est de savoir si, pour trans-

mettre les nuances de la parole ou de la musique — pianissimo ou fortissimo — il est préférable de travailler à profondeur de modulation variable ou constante. Autrement dit, l'amplitude du courant porteur doit-elle être constante, ou proportionnelle à l'amplitude du courant de modulation ?

Le premier cas est celui de tous les postes actuels de radio-diffusion ; on lui reconnaît les avantages suivants :

a) Simplicité relative des modulateurs.

b) Possibilité d'asservir l'amplification des récepteurs au courant continu fourni par leurs détecteurs, ce qui constitue une bonne protection contre les phénomènes d'évanouissement spectral (4). En réalité, cela n'est rigoureusement exact que si le détecteur utilisé est linéaire. Si le détecteur est parabolique, l'examen des deux premiers termes de l'équation (11) montre que le régulateur de gain dépendra également de l'amplitude des bandes latérales, mais seulement dans la proportion de 1 à $\sqrt{1+\frac{K^2}{2}}$ soit 22,5 pour cent maximum au moment des fortissimo $(K = 1)$ et si le fonctionnement du régulateur automatique de gain dépend du courant moyen détecté.

c) Possibilité de rechercher une station pendant les intervalles du programme où l'excitation du microphone est supprimée.

d) Possibilité de maintenir constante la puissance prise par les radiodiffuseurs à leurs secteurs d'alimentation.

Il ne s'agit pas ici des fluctuations de puissance à la fréquence $\frac{P}{2\pi}$ absorbées par les circuits oscillants d'accord, ni même de fluctuations de puissance à la fréquence $\frac{M}{2\pi}$ absorbées par les filtres d'alimentation, mais bien des fluctuations de puissance à la fréquence de succession des syllabes, des mots, des phrases ou même des différentes parties du programme radio-diffusé.

Seuls, de lourds volants pourraient absorber les fluctuations de charge de fréquences aussi basses, et encore pas pendant les intervalles.

Dans les transmetteurs Standard, à courant porteur constant, les variations de charge du secteur en fonction de la modulation sont rigoureusement nulles, que la modulation se fasse à haute puissance sur le dernier étage ou à basse puissance sur l'un des premiers étages.

(4) On désigne sous le nom « d'évanouissement spectral » les phénomènes d'évanouissement qui affectent également toutes les fréquences d'un certain spectre. Quand les phénomènes d'évanouissement sont plus sensibles pour certaines fréquences du spectre que pour d'autres, on emploie l'expression « d'évanouissement sélectif » pour désigner le phénomène.

Ce résultat a été obtenu en faisant travailler les amplificateurs basse fréquence en classe 1 et les amplificateurs haute fréquence en classe 3 (5).

Si l'on augmente l'excitation de grille d'un amplificateur basse fréquence, classe 1 (5), la puissance utile augmente, mais le rendement anodique croît dans la même proportion, de sorte que la puissance d'alimentation anodique reste constante.

Il en est de même dans les amplificateurs haute fréquence fonctionnant en classe 3 et amplifiant des courants haute fréquence préalablement modulés. La puissance d'alimentation anodique est ici proportionnelle à l'amplitude de l'excitation de grille, de sorte que cette puissance d'alimentation croît pendant les crêtes de modulation, mais décroît pendant les creux de modulation en gardant une valeur moyenne constante. En d'autres termes, dans les transmetteurs Standard de ces systèmes, dès qu'un fortissimo ($K = 1$) atteint le microphone, la puissance utile croît de 300 pour cent pour atteindre sa valeur de crête (équation 9), la puissance moyenne d'antenne croît de 50 pour cent (équation 8) et cependant la puissance prise au secteur reste constante.

L'augmentation de la puissance rayonnée s'est faite exclusivement aux dépens de la puissance dissipée dans l'eau de refroidissement des anodes.

Evidemment, la suppression complète d'à-coups de quelques centaines de kilowatts plusieurs fois par minute est favorable aux secteurs de distribution, mais préjudiciable au budget de la Compagnie de radio-diffusion. On peut remarquer ici incidemment que, si les amplificateurs basse fréquence classe 3 se développaient dans la technique future des radio-récepteurs fonctionnant sur le secteur et alimentant des haut-parleurs puissants, le secteur de distribution devrait fournir à chaque fortissimo, non seulement plusieurs centaines de kilowatts de plus aux radio-diffuseurs, mais encore plusieurs watts à 10 000, 100 000 auditeurs peut-être, soit un autre excédent de quelques centaines de kilowatts.

e) Amélioration de la qualité dans le cas de réception faible sur détecteur soi-disant linéaire ou de réception forte sur détecteur parabolique, par suite de la réduction du second terme de l'équation (21) par rapport au premier, chaque fois que la profondeur de modulation décroît.

---

(5) Voir ci-dessus note (4) p. 960.

Par contre, on reconnaît, aux radio-diffuseurs à porteur constant, les inconvénients suivants :

a) Le battement du porteur et des parasites reste constant, ainsi que les bruits de collecteur ou de redresseur du transmetteur. Ces bruits ne suivent donc pas les nuances de la parole et deviennent proportionnellement plus gênants pendant les pianissimo. En termes plus techniques, on peut dire que la valeur moyenne du rapport signal/parasite, établie pour tout un programme, est amoindrie par un fonctionnement à porteur constant.

b) La consommation supplémentaire d'énergie électrique des radiodiffuseurs de grande puissance (environ 600 kW d'alimentation) de ce système dépasse un million de francs par an, pour une utilisation de 10 heures par jour ou plus, sauf dans les cas où le fournisseur de courant prend à sa charge une partie de cette somme sous forme de réduction de tarif en faveur des appareils à charge constante.

Il va sans dire que les radio-diffuseurs à profondeur de modulation constante (donc à porteur variable), ont pour avantages les inconvénients des précédents et vice-versa. Nous avons envisagé ci-dessus le cas de la radio-diffusion de qualité où il est nécessaire de transmettre les nuances de la musique et du chant depuis les pianissimo jusqu'aux fortissimo (gamme de 100 décibels en rapport de puissances acoustiques ramenée usuellement à 30 décibels en rapport de puissances électiques).

En téléphonie commerciale, on pourrait envisager la réduction de cette gamme à trois décibels seulement par des contrôleurs automatiques de gain permettant aux amplificateurs basse fréquence de travailler à gain variable en fournissant une puissance de sortie presque constante et en tous cas peu dépendante de la puissance d'entrée.

Les moyens de réaliser un radio-diffuseur à profondeur de modulation constante sont nombreux. L'un des plus simples, prévu par Heising lui-même, consiste à superposer à la tension basse fréquence, appliquée à la plaque d'un modulateur Heising, non pas une tension continue *constante* comme dans le système habituel, mais une tension continue proportionnelle à la tension basse fréquence. Pour cela, on détecte et on amplifie séparément une dérivation du courant vocal.

Une variante consiste à provoquer, dans le circuit plaque d'un modulateur Heising ordinaire, une chute de tension inversement proportionnelle à l'amplitude des courants basse fréquence, en intercalant, en série dans le circuit plaque du modulateur Heising, la résistance ano-

dique interne variable d'un tube basse fréquence travaillant en classe 3. Un troisième moyen, plus simple encore, consiste à appliquer sur la grille d'un modulateur HEISING, une tension haute fréquence non pas constante, mais fonction de l'amplitude de la tension basse fréquence, c'est-à-dire, en somme, à moduler un courant haute fréquence déjà modulé suivant une loi déterminée.

Avant de quitter ce paragraphe relatif aux bandes naturelles, il y a lieu d'insister sur le fait qu'il ne faut pas chercher à voir le porteur sur la figure 1b. Le fait, par exemple que, pour K = 1, le courant haute fréquence s'annule au creux de modulation, ne veut pas dire qu'à ce moment là il n'y a plus de porteur, mais bien que les deux bandes d'amplitude $\frac{I_0}{2}$ sont à ce moment toutes deux en phase, mais en opposition de phase avec le porteur, de sorte que la résultante totale est nulle (fig. 1*d*).

Le système à profondeur de modulation constamment égale à 100 pour cent ne doit donc pas être confondu avec l'un ou l'autre des systèmes à porteur supprimé dont il sera question plus loin.

3.1.2. *Bandes inversées.*

Dans le but d'assurer le secret des communications radio-téléphoniques, ou plutôt de réduire leur diffusion, on a pensé les chiffrer en quelque sorte au départ, en remplaçant un son aigu par un son grave complémentaire et vice versa.

Imaginons un piano à clavier normal dont les leviers de commande reliant les touches aux frappeurs auraient été croisés de façon à ce que la mise en action d'une touche située à l'extrême droite du clavier fasse vibrer la corde symétrique de l'extrême gauche, seule la note centrale du clavier n'étant par conséquent pas codée.

Soit f la fréquence de cette note centrale et k le rapport des fréquences de deux cordes adjacentes ($\frac{1}{2}$ ton).

La clé du code serait la suivante :

La note de fréquence $k^n f$ serait remplacée par la note de fréquence $\frac{f}{k^n}$. L'intervalle entre deux notes consécutives du morceau exécuté sur un tel piano truqué comprendrait toujours le même nombre de $\frac{1}{2}$ tons que dans le morceau original, mais cet intervalle serait changé de signe. A part la cadence générale, le morceau ainsi exécuté serait donc entièrement déformé mais resterait mélodieux.

Le système de transmission à bandes inversées revient à effectuer,

électriquement, une opération analogue sur un piano à clavier spécial, caractérisé par le fait que les fréquences des notes successives varieraient en progression arithmétique et non plus en progression géométrique comme dans la gamme tempérée.

Nous avons vu plus haut (§ 2.3) que, pour inverser une bande de fréquences $f_1 - f_2$, il suffisait théoriquement de s'en servir pour moduler un porteur auxiliaire de fréquence $f_1 + f_2$ à l'aide d'un modulateur équilibré et de sélectionner la bande inférieure. La nouvelle bande ainsi obtenue sera substituée à la bande originelle pour transformer ainsi un système à bandes naturelles de porteur quelconque en un système à bandes inversées de même porteur ; il s'ensuit que rien ne sera modifié dans les radio-transmetteurs, ni dans les radio-récepteurs, il suffira de prévoir, dans les équipements terminaux, un système inverseur de bande avant l'entrée des amplificateurs basse fréquence des radio-transmetteurs et un autre système inverseur de bande dans les amplificateurs basse fréquence situés à la sortie des radio-récepteurs.

Un tel système fonctionne très bien sur les liaisons à ondes longues où il n'existe que des phénomènes d'évanouissement spectral, à l'exclusion de tout évanouissement sélectif (6). Sur ondes courtes, le système introduit une distorsion supplémentaire pendant les périodes d'évanouissement sélectif accusé. Nous avons vu en effet que, dans les périodes d'évanouissement ou de disparition du courant porteur, le deuxième terme de l'équation (21) devient prépondérant, de sorte que les harmoniques 2 de toutes les fréquences graves de la bande transmise restent à l'intérieur de la bande passante et par conséquent ne peuvent se filtrer. Cette production d'harmoniques 2 inexistant au départ, est déjà une cause de distorsion consonnante dans le système à bandes naturelles utilisant des détecteurs non linéaires. Dans le système à bandes inversées, cette distorsion n'est plus consonnante, ce qui est beaucoup plus grave, parce que les nouvelles fréquences introduites ne sont plus en relation harmonique avec celles les ayant provoquées, d'où dissonance. Considérons la bande 300 — 3 000 p:s modulant un porteur auxiliaire particulier de fréquence 300 + 3 000 = 3 300 p:s. Sélectionnons la bande inférieure. La note 300 p:s est remplacée par la note complémentaire 3 000 p:s et vice versa, seule, la note centrale 1 650 p:s reste inchangée. Cependant, en cas d'évanouissement sélectif, à la note 400 p:s transmise à la place de 2 900 p:s s'ajoutera la note parasite 800 p:s laquelle, après

(6) Voir ci-dessus note (4) p. 960.

réinversion de la bande, donnera la note parasite *dissonnante* 2 500 p:s.

Pratiquement, sur ondes courtes, le système de secret par inversion des bandes ne peut s'utiliser que lorsque les conditions de transmission dans l'éther le permettent. Les possibilités d'emploi du système sur ondes courtes sont encore plus réduites quand on utilise des récepteurs munis de détecteurs paraboliques. A ce point de vue, la détection par la grille est supérieure à la détection par la plaque lorsqu'il s'agit d'ondes d'amplitude moyenne.

3.1.3. *Bandes écartées.*

On évite l'inconvénient précédent en écartant les bandes rendues ainsi anharmoniques au lieu de les inverser purement et simplement. Dans ce cas, les harmoniques 2 des fréquences de la bande passante se trouvent en dehors de la dite bande et il devient possible de les éliminer par des filtres appropriés.

Pour cela, nous avons vu, au paragraphe 2.3, que tout se passe comme s'il suffisait de se servir de la bande passante $f_1 - f_2$ pour moduler un porteur de fréquence légèrement supérieure à $(f_2 - 2f_1)$. Exemple numérique : Considérons la bande commerciale usuelle 300 à 3 000 p:s. On voit que, si la fréquence 500 p:s de cette bande est doublée par distorsion harmonique, il en résultera une fréquence parasite de 1 000 p:s malheureusement comprise entre les limites de la bande passante. Modulons donc un porteur de fréquence un peu supérieure à 3 000 — 2 fois 300 = 2 400, disons un porteur de 2 500 p:s par exemple. Sélectionnons la bande supérieure obtenue de 2 800 à 5 500 p:s.

L'ancienne fréquence particulière considérée de 500 p:s aura, elle aussi, subi une translation de 2 500 p:s et deviendra égale à 3 000 p:s. La fréquence parasite obtenue en cas de distorsion harmonique sera donc 6 000 p:s et sera par conséquent extérieure à la bande passante 2 800 — 5 500 p:s.

Le système de bandes écartées assure un secret relatif aussi bon que celui des bandes inversées. En pratique, on a intérêt à faire le déplacement de la bande en 2 modulations successives, pour éviter l'harmonique 2 du courant porteur à 2 500 p:s transmis par le modulateur CARSON, ce dernier, étant à l'intérieur de la bande utilisée 2 800 à 5 500 p:s, pourrait être gênant.

A ce point de vue, le système à bandes écartées est donc très avantageux à employer sur les liaisons à ondes courtes où la distorsion har-

monique est inévitable en cas d'évanouissement sélectif, (sauf dans le système à bande unique ré-introduisant localement l'onde porteuse). On peut, cependant, reprocher au système utilisant un porteur et deux bandes écartées, d'occuper dans l'éther une place légèrement plus grande que le double de celle strictement nécessaire dans le système à bandes naturelles. En réalité, cette objection n'est valable qu'en ce qui concerne les radio-transmissions exclusivement téléphoniques. Cependant, il faut remarquer que ce système présente l'avantage considérable de se prêter très facilement aux transmissions téléphoniques et télégraphiques simultanées ou à la téléphonie et télégraphie multiplex. En effet, il est possible, par exemple, de placer une voie télégraphique à 3 500 p:s et de considérer l'ensemble téléphone et télégraphe comme une bande de 3 500 p:s qui sera déplacée de la même façon que la bande téléphonique de 300 à 3 000 p:s sur laquelle nous avions fait le raisonnement précédent. Il en résulte que les produits d'intermodulation de premier ordre, tant dans le transmetteur que dans le récepteur, ou ceux dus à l'évanouissement sélectif, seront en dehors de la bande reçue, et pourront être éliminés par un simple filtre.

L'emploi des bandes téléphoniques écartées constitue donc un progrès certain au point de vue de la qualité de la transmission, ainsi que pour la téléphonie et télégraphie simultanées.

3.1.4 *Bandes entremêlées.*

Ce système consiste à découper la bande passante en différentes tranches, à déplacer ces diverses tranches de quantités inégales, de manière à les retrouver juxtaposées dans un ordre quelconque en un autre lieu du spectre des fréquences électromagnétiques. Rien n'empêche d'ailleurs d'inverser quelques-unes des tranches élémentaires avant de les juxtaposer à nouveau.

Ce système à bandes dites entremêlées est en somme une généralisation du système inversé. La clé du code a été évidemment compliquée de façon à rendre le secret plus complet.

Si nous reprenons l'analogie du piano truqué nous pouvons dire que la clé du code consiste, non pas à croiser simplement les leviers reliant les touches aux marteaux, mais à entremêler ces leviers dans un ordre quelconque, bien que déterminé, de façon qu'à la succession des touches corresponde une suite de sons absolument quelconques. Le système présente les mêmes inconvénients que celui des bandes inversées en cas d'évanouissement sélectif sur ondes courtes, mais

rien n'empêche évidemment d'écarter les bandes entremêlées comme on écarte les bandes inversées pour éliminer cet inconvénient.

3.1.5. *Bandes transmises par d'autres voies que le porteur.*

Dans certains cas, soit dans le but d'assurer un secret relatif des radio-communications, soit dans le but d'augmenter le rendement des amplificateurs de transmission ou le gain et la sélectivité des amplificateurs de réception, on peut songer à amplifier individuellement chacune des deux bandes latérales et le courant porteur. On dispose ainsi de trois voies amplificatrices autonomes, complétées, si on le désire, par trois voies transmettrices indépendantes. En réalité, dans ce cas, on a généralement intérêt à transmettre l'onde porteuse et une seule des bandes latérales pour les raisons que l'on verra plus tard.

L'augmentation du rendement des amplificateurs de transmission est due à ce que, dans un amplificateur travaillant en classe 3 (7) la puissance de l'alimentation anodique est proportionnelle à l'amplitude de l'excitation grille, alors que la puissance utile est proportionnelle au carré de cette excitation. Il en résulte que le rendement est lui-même proportionnel à l'amplitude de l'excitation grille. Si donc un amplificateur de ce type est agencé de manière à délivrer les puissances de crête avec un bon rendement, de 70 pour cent par exemple, le rendement tombera à 35 pour cent pendant les intervalles du programme où le porteur seul est amplifié, et à 0 pour cent pendant les creux de modulation maximum.

Or, si le porteur était amplifié séparément par un amplificateur indépendant travaillant à pleine excitation, il serait amplifié avec un rendement constant de 70 pour cent, d'où économie notable, d'autant plus que, pendant les intervalles du programme, les amplificateurs autonomes de bandes ne seraient plus excités et ne consommeraient par conséquent aucune puissance anodique.

Ici encore nous trouvons une économie sur la puissance d'alimentation anodique totale, mais toujours au détriment de la constance de la puissance prise au secteur.

Il est cependant difficile de maintenir les valeurs instantanées des phases des deux bandes latérales égales entre elles et de signe contraire par rapport au courant porteur, étant donné que, dans un amplificateur, le déphasage entre la tension à l'entrée et la tension à la sortie dépend de la résistance anodique interne, laquelle est fonction de l'amplitude

(7) Voir ci-dessus note (4) p. 960.

de l'excitation de grille. On évitera cet inconvénient en se limitant à l'emploi d'une onde porteuse et d'une seule bande, ce qui élimine la question de phase.

L'augmentation du gain et de la sélectivité des récepteurs amplifiant séparément le courant porteur et une bande latérale est due à ce que l'amplification d'un porteur à fréquence bien stable peut se faire au moyen d'amplificateurs utilisant des circuits de couplage à bande passante très étroite, employant, si besoin est, des résonateurs piézoélectriques à très faible amortissement.

De tels circuits présentent des coefficients de surtension extrêmement avantageux, d'où augmentation du gain et atténuent considérablement les émissions parasites se trouvant au voisinage immédiat, mais à l'extérieur de la bande passante très étroite, d'où augmentation de la sélectivité.

3.2 *Transmission permanente des deux bandes latérales avec suppression intermittente du porteur.*

Ce système consiste à supprimer le courant porteur chaque fois que la station ne parle pas, c'est-à-dire chaque fois que la profondeur de modulation devient nulle. Les avantages du système sont les suivants :

a) Economie sur la puissance d'alimentation anodique de la station.

Cet avantage est évident. Remarquons toutefois que l'économie est toujours réalisée au détriment de la constance de la puissance prise au secteur.

b) Dans le cas de stations radio-téléphoniques travaillant en Duplex, la station qui se trouve sur la position « réception » n'est plus gênée par le courant porteur du transmetteur local.

Si le courant porteur local n'était pas supprimé pendant les périodes de réception, il serait nécessaire que le Duplex se fasse sur deux longueurs d'ondes d'autant plus différentes que la proximité du récepteur et du transmetteur de la même station serait elle-même plus grande. Or, dans le cas des stations de bord où la place est limitée, même dans le cas des plus grands transatlantiques, les appareils se trouvent souvent dans la même cabine où dans deux cabines relativement rapprochées. Dans le cas des stations terrestres, il y a également économie d'exploitation, en ce qui concerne tant le personnel que les frais généraux, à rassembler les transmetteurs et les récepteurs dans le même bâtiment.

De plus, le système économise les longueurs d'ondes, puisque la même fréquence sert à la transmission et à la réception.

c) Un troisième avantage indirect du système est de pouvoir utiliser la même antenne à la réception et à l'émission. Le fonctionnement Duplex à *antenne unique* est une conséquence du fonctionnement Duplex à *longueur d'onde unique*. Dans le cas d'utilisation d'antennes directives onéreuses, soit par leur construction, soit par le terrain qu'elles occupent, cet avantage devient important au point de vue économique.

Les diverses commutations nécessitées par le système de suppression intermittente du porteur sont réalisées automatiquement au moyen de relais commandés par les courants vocaux eux-mêmes, préalablement amplifiés et détectés. Chacun de ces relais est retardé de façon à n'agir qu'au bout d'un temps déterminé, de manière à ce que les relais agissent successivement dans un ordre soigneusement prédéterminé.

Deux systèmes ont été réalisés par les Laboratoires L. M. T. employant, soit des relais mécaniques, soit des relais électroniques.

Les avantages énumérés ci-dessus en (*a*), (*b*), (*c*), ne sont pas des avantages exclusifs du système à suppression intermittente du courant porteur. Les mêmes avantages seraient à mettre à l'actif du système 3.1.1.2 décrit ci-dessus et des systèmes 3.3 et 3.4 décrits ci-après.

En effet, dans ces trois systèmes, le courant porteur est nul, soit en permanence, soit dès que la profondeur de modulation égale 0, c'est-à-dire par intermittence comme dans le système 3.2 faisant l'objet de ce paragraphe.

3.3 *Transmission permanente de deux bandes latérales avec suppression permanente du courant porteur.*

Considérons un pont de Wheatstone équilibré dont un des côtés comprend un microphone.

Alimentons ce pont dans une diagonale par un oscillateur à haute fréquence de pulsation P et excitons une antenne de transmission par le courant de l'autre diagonale. Il résulte de l'équilibre du pont, en l'absence d'excitation de microphone, que le courant porteur dans l'antenne sera nul. Le même résultat est obtenu à l'aide du modulateur équilibré représenté par la figure 3 et étudié sous le § 2.2. Si l'on écoute une telle émission à l'aide d'un récepteur usuel, sans rétablir le courant porteur, on n'entendra que le battement incompréhensible des deux bandes latérales entre elles. Ce battement sera à pul-

sation 2M correspondant à la différence des pulsations B_i et B_s (formules 5 et 6). Pour rendre la réception intelligible, on peut envisager les moyens suivants :

a) Puisque les fréquences utiles sont doublées à la réception, il suffit de les diviser par 2 avant de les transmettre. Le problème de la division des fréquences par 2 est plus difficile que celui de la multiplication des fréquences par 2. Néanmoins, il a été résolu lorsqu'il s'agit d'une seule fréquence à diviser ou à multiplier, même si cette fréquence est quelconque, *pourvu qu'elle soit unique* (comme dans le cas des doubleurs ou diviseurs de fréquence apériodiques).

Si, par exemple, nous appliquons simultanément, à l'entrée du doubleur de fréquence apériodique, deux fréquences distinctes, ces fréquences ne sont pas doublées comme si elles avaient été appliquées individuellement. Ceci est dû au fait qu'un doubleur n'est pas un système linéaire.

Renonçons donc à diviser par 2 toutes les fréquences appliquées au modulateur de transmission, pour envisager les autres moyens de recevoir convenablement une radio-transmission composée de deux bandes latérales, sans le courant porteur correspondant.

b) On peut, pour cela, rétablir purement et simplement le porteur à la réception. C'est d'autant plus facile que l'on trouve ce porteur dans les fréquences parasites de détection énumérées par l'équation (11) ; la détection des 2 bandes $B_s - B_i$ fournira un terme en $B_1 - B_i$, c'est-à-dire en 2M, mais aussi un terme en $B_s + B_i$, c'est-à-dire en 2P.

Il suffira donc d'isoler ce terme en 2P dans un diviseur de fréquence périodique et de l'amplifier par un amplificateur comportant un étage saturé ou un contrôle de gain muni d'une constante de temps adéquate, de façon à atténuer les variations de son amplitude avec K.

c) On peut aussi régénérer à la réception le courant porteur par des oscillateurs locaux, suffisamment stables ou contrôlés par le poste émetteur, à défaut de stabilité satisfaisante.

Renvoyons au § 3.4 l'étude de tels systèmes (oscillateur synchrone ou synchronisé).

d) Un dernier moyen, et qui paraît le plus intéressant, consiste à éviter le battement à fréquence 2M des deux bandes en éliminant une de ces bandes à la réception et en employant ensuite un récepteur à bande latérale unique tel que ceux décrits sous le § 3.4 ci-après.

On voit donc que les méthodes permettant de recevoir correctement une émission radio-téléphonique composée de deux bandes latérales

sans courant porteur, ne sont pas moins complexes que celles permettant de recevoir correctement une transmission à bande latérale unique. Si l'on conserve les deux bandes, il est nécessaire que le porteur régénéré ait, non seulement la fréquence voulue, mais encore la phase voulue, tandis que dans le système à bande latérale unique, le porteur local doit être simplement synchrone, mais peut être de phase quelconque. En effet, dans le système à deux bandes, le porteur régénéré battra individuellement avec chacune des deux bandes, de sorte que la phase des deux battements interviendra lors de la superposition des produits de détection de ces deux battements.

On peut donc se demander avec raison pourquoi envisager l'application d'un tel système plus compliqué que celui de la bande latérale unique et moins avantageux, en ce qui concerne l'encombrement de l'éther, la qualité en cas d'évanouissement sélectif, etc. En réalité, le système à deux bandes n'est avantageux que dans des cas très particuliers, où le transmetteur doit être simple. Par exemple, dans le cas de téléphonie entre les avions et la terre. Dans cette application, peu importe, en effet, la complication du système de réception, puisque celui-ci est à terre, s'il en résulte une économie de poids dans le système de transmission situé à bord de l'avion pour une efficacité déterminée. Or, précisément, les transmetteurs d'avion utilisent généralement des tubes émetteurs de faible puissance dont la portée est limitée, en fait, par la dissipation anodique maximum tolérable.

Nous verrons, au paragraphe suivant, que ce cas est précisément celui pour lequel la transmission à bande uni-latérale ou à bandes bi-latérales sans porteur est la plus avantageuse en téléphonie. Nous montrerons que le gain obtenu peut atteindre 14 à 18 décibels ou plus, de sorte qu'un avion muni d'un transmetteur de ce type, d'une puissance de 10 W par exemple, aurait une portée du même ordre que celle obtenue par l'emploi d'un transmetteur ordinaire d'environ 1 kW, c'est-à-dire incomparablement plus lourd.

C'est en vue de cette application intéressante que le système à deux bandes a été décrit.

3.4 *Transmission exclusive d'une seule bande.*

Dans ce système de radio-téléphonie, certainement le plus rationnel (cas de la radio-diffusion excepté), on supprime complètement, à l'émission, l'une des deux bandes latérales, ainsi que le courant porteur. Pour les raisons indiquées au début du § 3, nous n'étudierons pas ici les méthodes envisagées à la fin du § 2.3, qui permettent la

production directe d'une bande latérale unique. Nous ne considérerons que l'application du système classique d'utilisation de porteurs auxiliaires destinés à écarter les bandes pour faciliter leur filtrage. Historiquement, ce système, inventé par Carson, fut employé tout d'abord pour les communcations par courant porteur le long des fils. Une première application à la radio-téléphonie par ondes longues fut exploitée commercialement dès 1925 entre New-York et Londres.

Enfin, en 1931, le système propose par M. Reeves. pour les ondes courtes, fut expérimentées entre Trappes et Madrid.

Ce système consiste à utiliser un récepteur qui *s'accorde automatiquement*, par ses propres moyens, sur l'émission à recevoir. Si la fréquence de cette dernière varie pour une raison quelconque, voulue ou non, le récepteur agit lui-même de manière à modifier ses réglages pour ne pas perdre l'émission.

On verra, par la suite, que l'emploi du système à bande unique sur une liaison permet de gagner dans tous les cas 9 décibels sur le rapport puissance utile, puissance parasite. (6 db sur l'augmentation de puissance et 3 db sur la réduction des parasites) et même 12 db si la comparaison se fait à qualité égale (9 db sur le signal et 3 db sur les parasites).

Dans certains cas particuliers, ce gain peut atteindre 14 à 18 db suivant le caractère de la musique ou de la parole transmises.

Enfin, en cas d'évanouissement sélectif, le système à bandes naturelles peut perdre 3 db d'efficacité, de sorte que le système à bande unique présente alors, sur ondes courtes, un intérêt maximum pouvant atteindre 29 db (et même dans certains cas 37 db) si les conditions sont à la fois favorables au système à bande unique et défavorables au système ordinaire à bandes naturelles.

Or, un gain de 9 à 29 décibels sur une liaison radio, représente, en période de crise, une économie possible de plusieurs millions de francs français par station et par an, alors qu'en période de prospérité, elle représente une augmentation appréciable de la durée du trafic commercial possible pour une portée déterminée.

Bien d'autres avantages sont à mettre à l'actif du système à bande latérale unique appliqué aux ondes courtes. Nous leur consacrerons plus loin un paragraphe spécial. Mais, pour bien les comprendre, il importe d'examiner au préalable et en détail les circuits transmetteurs, puis les circuits récepteurs.

3.4.1. *Circuits transmetteurs.*

Lorsque la fréquence de l'onde porteuse est faible, de l'ordre de 20 kp:s par exemple, (cas des communications par ondes guidées le long des fils), il n'y a pas de difficulté. Les bandes naturelles sont suffisamment écartées relativement pour être séparées au moyen de filtres ordinaires bien construits. La figure 3 est assez claire pour dispenser de tout commentaire.

Lorsque la fréquence est un peu plus élevée, la séparation des bandes

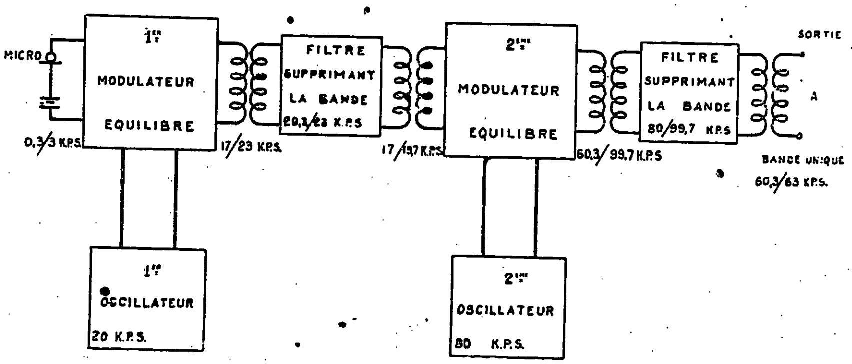


Fig. 4. — Transmission à bande unique ; double modulateur équilibré.

devient difficile, mais nous avons vu, aux § 2, 3, qu'il suffisait de les écarter suffisamment au préalable par une seconde modulation pour les séparer ensuite assez facilement. Cette double modulation permet également à la station de changer de longueur d'onde sans modifier les fréquences de coupure des filtres employés.

La figure 4 illustre le système employé à Rugby pour des ondes de l'ordre de 5 000 m de longueur. Nous ne décrirons plus cette installation en détail, étant donné qu'elle a déjà fait l'objet d'une description complète présentée à la Société Française des Electriciens le 6 novembre 1926, et publiée dans le bulletin d'avril 1927.

Enfin, dans le cas d'ondes courtes de l'ordre de quelques décamètres, on a recours à la triple modulation. La figure 10 indique, d'une manière claire, les deux hétérodynes auxiliaires à 19 et 250 kp:s. On peut constater que la troisième et dernière modulation se fait directement sur un étage doubleur de fréquence faisant normalement partie du transmetteur Standard représenté schématiquement par la partie inférieure de la figure. Ce troisième et dernier modulateur n'est pas équilibré, mais l'écartement des bandes est suffisant pour que l'une

des bandes et le courant porteur puissant être convenablement atténués du fait de la résonance des circuits oscillants de couplage. Cependant, dans une installation définitive, le dernier modulateur serait équilibré. On remarque l'avantage donné ici par la modulation des transmetteurs à basse puissance, ce qui permet de les utiliser à volonté pour la transmission d'une bande latérale unique ou du courant porteur accompagné de ses deux bandes naturelles. Le passage d'un des systèmes de transmission à l'autre peut se faire d'ailleurs assez rapidement par des commutations relativement simples.

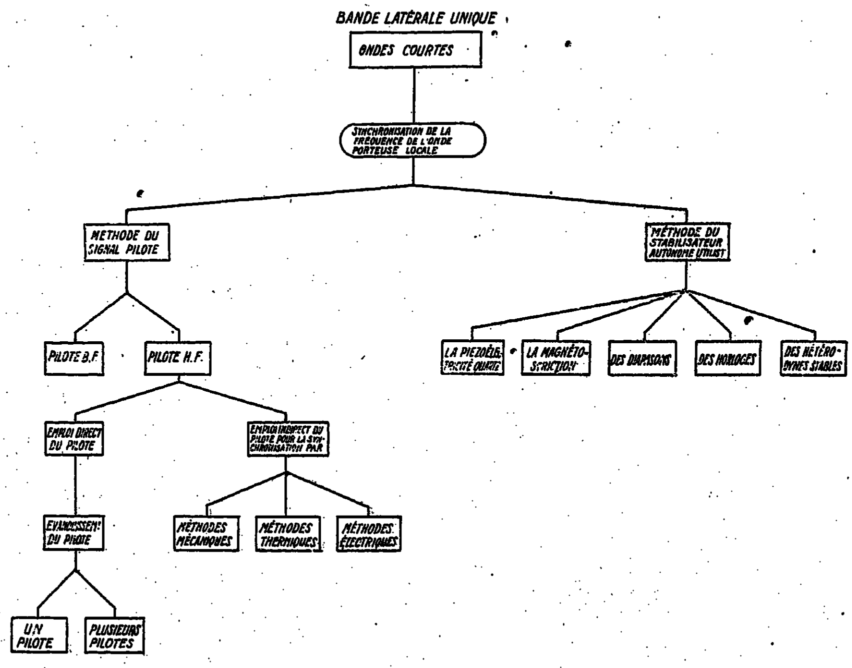


Fig. 5.

3.4.2 *Circuits récepteurs.*

Un radio-récepteur d'un type quelconque peut être utilisé pour la réception d'une bande latérale unique, à condition de lui adjoindre une hétérodyne rétablissant le courant porteur. Ce courant porteur peut être rétabli avec une phase quelconque, à condition d'être synchrone du courant porteur supprimé. Le problème fondamental à résoudre dans le système de réception à bande unique est donc celui de la *synchronisation de l'oscillateur local*. Ce problème est plus ou moins ardu suivant que la fréquence des oscillations est plus ou moins élevée et suivant que l'on utilise un récepteur synchrone ou

simplement synchronisé. On voit fig. 5 un tableau des principales méthodes proposées.

3.4.2.1. *Récepteur synchrone.* (8)

La précision avec laquelle le synchronisme doit être maintenu est de l'ordre de ± 15 p:s soit, par exemple, ± 7,5 pour cent sur le transmetteur et ± 7,5 pour cent sur le récepteur. Cela correspond, pour des ondes longues de l'ordre de celles utilisées à Rugby (60 k p:s), à une précision relative de 1/8 000 facile à obtenir avec des hétérodynes stables d'un type ordinaire. Sur ondes courtes de l'ordre de 15 m (20 000 k p:s), la précision nécessaire atteint une valeur relative de 1/3 000 000. Il est possible d'atteindre une telle précision à l'aide d'oscillateurs à quartz dont la température serait maintenue constante à une fraction de 1/100e de degré centésimal près. En fait, cette précision a été obtenue aux Laboratoires L. M. T. et par d'autres, mais le problème devient plus difficile dès qu'on doit maintenir ces conditions en exploitation commerciale. La méthode, bien que de réalisation possible, nécessite une surveillance des appareils assez minutieuse.

Il faut remarquer que, lorsque la méthode du récepteur synchrone autonome est utilisée, la même précision de ± 7,5 p:s en valeur absolue doit être observée en ce qui concerne la fréquence du transmetteur lui-même. On est donc conduit à réaliser des transmetteurs environ 300 fois plus stables que ceux acceptés par les conventions internationales. D'autre part, toute variation de fréquence imputable aux variations du milieu de transmission lui-même est préjudiciable au fonctionnement de l'ensemble. Par suite de l'effet Doppler, toute variation de longueur du chemin parcouru par les ondes dans l'éther se traduit par une variation de fréquence à l'arrivée, même si la fréquence au départ est rigoureusement stable. C'est ainsi que la note de hauteur constante émise par un sifflet de locomotive s'éloignant d'un observateur est entendue par ce dernier sous la forme d'un son plus grave que celui réellement émis.

Enfin, dans le but d'assurer le secret des communications, on peut avoir intérêt à faire varier systématiquement la fréquence du courant

(8) Dans une récente et très intéressante étude, M. Henri de Bellescize propose de réserver le nom de récepteurs synchrones à ceux dans lesquels l'oscillation locale garde une différence de phase sensiblement constante avec l'oscillation incidente. Nous comprenons ici sous ce terme, non seulement ce type de récepteurs, mais aussi celui où les 2 fréquences en jeu sont simplement maintenues sensiblement égales.

porteur au départ, même si ce courant porteur n'est pas transmis. En effet, si l'onde porteuse supprimée est à fréquence extrêmement constante, il suffit de réaliser un oscillateur à fréquence très stable pour pouvoir capter la communication. Au contraire, si l'onde porteuse varie de fréquence suivant une loi complexe, il faut, pour capter la communication, un récepteur complet synchronisé dont la réalisation est trop difficile pour la plupart des indiscrets, même spécialisés.

Dans ce cas, *comme dans les précédents*, il est donc bien évident qu'il est nécessaire d'utiliser à la réception, non pas un récepteur synchrone, mais un récepteur synchronisé, c'est-à-dire non pas un oscillateur à fréquence constante, mais un oscillateur dont la fréquence suit les fluctuations de fréquence imputables au transmetteur ou au milieu de transmission.

3.4.2.2 *Récepteur synchronisé.*

Nous venons de voir que l'emploi d'un récepteur synchronisé permet d'utiliser la méthode de transmission radio-téléphonique à bande latérale unique, même si la fréquence du transmetteur n'est pas extraordinairement stable, ou encore si cette fréquence varie systématiquement au départ ou accidentellement entre les antennes de transmission et de réception.

La méthode de l'oscillateur local synchronisé permet aussi d'employer des récepteurs superhétérodynes à une ou plusieurs fréquences intermédiaires, en ne synchronisant qu'une des dernières fréquences auxiliaires utilisées. Dans ce cas, l'appareil de synchronisation tient compte, non seulement des variations de fréquence de l'onde reçue, mais encore des variations de fréquence de toutes les hétérodynes auxiliaires employées.

L'avantage de la méthode est de reporter le régulateur de fréquence sur une hétérodyne à fréquence plus basse, de sorte que la tolérance fixée à ± 15 p:s en valeur absolue, devient *relativement* de moins en moins sévère. Une analogie mécanique très simple fera bien comprendre l'intérêt du système. Un superhétérodyne, ou récepteur changeur de fréquence, peut être assimilé aux roues arrière d'une voiture automobile. La vitesse de la roue droite est l'analogue de la fréquence incidente, celle de la roue gauche représentant la fréquence de l'oscillateur de battement, alors que la vitesse des satellites, différence des vitesses angulaires des deux roues, représente la fréquence de battement, différence des deux fréquences incidente et locale. Pour assurer le synchronisme des deux roues ou leur asynchro-

nisme constant, il suffit de placer un seul régulateur de vitesse sur les satellites au lieu de deux régulateurs de vitesse beaucoup plus sensibles et précis sur les deux roues. Il faut évidemment, dans le système électrique, que les premières hétérodynes auxiliaires soient relativement aussi stables que possible, de façon à ne pas élargir inutilement la zone d'action nécessaire du régulateur de fréquence. Pour asservir la fréquence de l'hétérodyne synchronisée du récepteur à la fréquence du porteur supprimé dans le transmetteur, ainsi qu'aux fluctuations de fréquences attribuables aux milieux de transmission ou aux premières hétérodynes du récepteur, il faut utiliser un signal pilote qui soit affecté *de la même manière que la bande passante* par les perturbations énumérées ci-dessus.

Il faut donc que le signal pilote ait une fréquence liée à celle du transmetteur et subisse les mêmes changements de fréquences successifs dans le récepteur que la bande passante. Il faut, de plus, que le signal pilote soit transmis par une voie radio aussi proche que possible de la voie transmettant la parole, de façon à subir dans l'éther les mêmes perturbations.

Nul doute que ces conditions ne sont remplies que si le signal pilote se compose d'une ou plusieurs raies auxiliaires encadrant de très près le spectre des raies radio-téléphoniques indispensables à la compréhension de la parole. Nous disons de très près, pour que l'effet Doppler et les phénomènes d'évanouissement affectent de la même manière, autant que possible, les raies auxiliaires et les raies indispensables.

Dans ce cas, peu importe que l'ensemble de ces raies se déplace dans le spectre hertzien, par suite des variations de fréquence du porteur ou des premières hétérodynes de réception, pourvu que l'écartement des raies reste le même. Or, cet écartement est fixé une fois pour toutes dans le premier modulateur du transmetteur et reste ensuite immuable, sous la seule réserve que les variations de longueur des chemins utilisés (métalliques, ionisés ou diélectriques) produisent les mêmes effets pour toutes les fréquences de la bande passante.

Ceci posé, on peut être tenté de conclure que le courant porteur lui-même constitue un excellent signal pilote, puisqu'il est à l'extérieur d'une des deux bandes et très proche (300 p:s) de l'une de ses frontières.

Ceci est partiellement vrai, mais en réalité, le système à bande unique à courant pilote est supérieur au système à bande unique à courant porteur pour les raisons suivantes :

a) Le courant pilote peut être d'une puissance inférieure de 20 db pour les tiers.

b) Le courant pilote peut être d'une puissance inférieure de 20 db à celle de la bande latérale, alors que la puissance du courant porteur naturel est supérieure de 6 db à celle de ladite bande, de sorte que là où un signal pilote artificiel de 1 kW suffit, un porteur naturel de 400 kW serait nécessaire.

Le courant pilote, bien que d'une puissance réduite au 1/100e de celle de la bande latérale, sera reçu néanmoins dans d'aussi bonnes conditions que la bande, parce que cette dernière occupe cette largeur de 3 000 p:s, alors que les circuits recevant le pilote n'ont qu'une largeur de bande de 30 p:s. Toutes choses égales d'ailleurs, la puissance des parasites, dans les circuits recevant le pilote, est donc 100 fois plus petite que la puissance des parasites collectés dans les circuits recevant la bande téléphonique. Un pilote 100 fois moins puissant a donc la même efficacité, puisqu'il correspond à un même rapport signal à parasite.

Il faut remarquer cependant que, bien que le filtre de réception du pilote ait une largeur de bande aussi réduite que 30 p:s, la fréquence du pilote lui-même peut varier beaucoup plus, pourvu que ses variations soient lentes. En effet, ainsi qu'on le verra plus loin, les deux frontières du filtre à bande étroite recevant le pilote ne sont plus fixes, mais se déplacent — tout en conservant leur écartement de 30 p:s — de manière à ne pas cesser d'encadrer la fréquence pilote. Il a donc fallu résoudre le problème du filtre à bande passante étroite mais à *frontières variables équidistantes*.

c) Le pilote, dans le Système Reeves, est utilisé pour synchroniser un oscillateur, alors que le porteur, dans les récepteurs ordinaires, est simplement amplifié. Il s'ensuit qu'en cas d'évanouissement sélectif du porteur de durée un peu longue, la réception devient impossible dans le système à courant porteur et à bande unique, alors que dans le système à courant pilote et à bande unique, l'oscillateur cesse d'être contrôlé, mais continue à osciller. En toute rigueur, les circuits oscillants des amplificateurs du premier système peuvent également continuer à osciller pendant plusieurs centaines, milliers ou dizaines de milliers de périodes, selon leur décrément, après la cessation de leur excitation. Sur ondes courtes, il sera cependant difficile, même en utilisant des résonateurs piézo-électriques à faible amortissement, d'atteindre la seconde, sans que l'amplitude des oscillations n'ait décru de plus de 10 ou 20 db. Une grande durée d'oscillations

autonomes est d'ailleurs incompatible avec une largeur de bande suffisamment grande pour compenser les fluctuations lentes de fréquence des transmetteurs, à moins de multiplier beaucoup le nombre des circuits oscillants utilisés.

d) Le courant pilote présente, sur le courant porteur, l'avantage de pouvoir être multiplié de manière à être moins influencé par les phénomènes d'évanouissement sélectif; on peut, par exemple, utiliser deux pilotes, l'un à 300 p:s, sous la frontière inférieure de la bande, l'autre à 300 p:s au-dessus de la frontière supérieure de la bande (300 à 3 000 p:s). Le battement à fréquence constante (3 300 p:s) des deux courants pilotes contribue d'ailleurs à augmenter le secret des radiocommunications, en provoquant un sifflement permanent dans les récepteurs ordinaires.

Ayant ainsi opté, sur ondes courtes, pour la méthode du signal pilote synchronisateur, de préférence à celle du courant porteur, même réduit au départ et sur-amplifié à la réception, voyons quelles sont les conditions à remplir par le synchronisateur et quels sont les différents moyens mécaniques, thermiques ou électriques réalisés.

3.4.2.2.1 *Conditions à remplir par le synchronisateur*

Nous voulons, en somme, qu'un courant incident de fréquence variable batte avec une hétérodyne locale de fréquence asservie, de telle sorte que la fréquence du battement reste constante. Si cette constante est nulle, nous tombons dans le cas particulier du véritable synchronisme. Si cette constante n'est pas nulle, nous devons réaliser ce que l'on peut appeler un asynchronisme constant. Le cas particulier du synchronisme absolu correspond au rétablissement du courant porteur dans un récepteur amplificateur détecteur, sans changement de fréquence. Le cas général de l'asynchronisme constant correspond, au contraire, à l'emploi de récepteurs dits super-hétérodynes, comportant un ou plusieurs changements de fréquence. Dans le premier cas particulier, le synchronisateur est analogue à un régulateur de vitesse de machine tournante. Le second cas général est absolument équivalent au premier, à condition de placer le régulateur de vitesse, non pas sur la machine asservie, mais sur l'axe des satellites d'un différentiel couplant la machine asservie à la machine directrice.

Dans tous les cas, il s'agit de réduire à $\pm$ 15 p:s au maximum des fluctuations de fréquence pouvant atteindre par exemple $\mp$ 3 000 p:s.

Une autre condition importante à remplir par le synchronisateur est celle de sa constante de temps, c'est-à-dire du temps qui lui est

nécessaire pour agir. Si nous reprenons l'analogie mécanique précédente, nous dirons que, pour établir le projet d'un régulateur de vitesse, il est nécessaire de connaître, non seulement les vitesses que pourrait prendre la machine en l'absence de régulateur, ainsi que les limites entre lesquelles il est nécessaire de maintenir cette vitesse, mais encore les accélérations que la machine est susceptible de subir. En ce qui concerne la constante de temps du synchronisateur que nous cherchons à réaliser, le problème est compliqué par le fait que cette constante de temps doit être assez grande pour qu'en cas d'évanouissement sélectif du pilote, la fréquence asservie ne varie pas de plus de 20 p:s, mais aussi par le fait que cette constante de temps ne doit pas être trop grande, au point de ne pas permettre à l'appareil de suivre les fluctuations un peu rapides des fréquences incidentes qu'il doit annuler.

Nous savons que ces dernières variations sont dues, soit à l'instabilité du transmetteur lui-même, soit à un effet Doppler dans l'éther.

Or, l'instabilité d'un transmetteur moderne, muni d'un maître oscillateur de précision, est toujours très progressive, en ce sens que les variations de fréquence ne sont jamais brusques, mais au contraire réparties sur un temps assez long. En pratique, on ne constate qu'une variation de quelques centaines de périodes par heure, de sorte qu'on peut admettre raisonnablement, pour les variations lentes de fréquence des transmetteurs, le chiffre de 10 p:s par minute. En ce qui concerne l'effet Doppler, l'incertitude est plus grande, faute d'un nombre suffisant d'observations systématiques, néanmoins, il semble être très rare que ces variations dépassent 10 p:s.

En téléphonie commerciale, jusqu'à 15 m de longueur d'onde, les deux valeurs limites dont doit tenir compte la constante de temps du synchronisateur sont compatibles.

Dans d'autres cas (télévision, ondes ultra-courtes, etc...) elles pourraient ne plus l'être. Il faudrait alors recourir, soit au multipliage des signaux pilotes, soit à l'asservissement de la constante de temps du régulateur à l'amplitude des signaux pilotes.

En dehors de ces conditions générales, le synchronisateur pourrait avoir à remplir des conditions particulières dans certains cas spéciaux :

Si l'on désire, par exemple, radiotéléphoner, non seulement à bande latérale unique, mais aussi en duplex à longueur d'onde unique sur antenne unique, on pourrait envisager la suppression intermittente du pilote (comme dans le système 3,2 de suppression inter-

mittente du porteur) ce qui imposerait de nouvelles conditions concernant la constante de temps du synchronisateur.

3.4.2.2.2 *Synchronisateur mécanique*

On pourrait imaginer, par exemple, qu'une variation de fréquence provoque dans un circuit une variation de courant et que l'axe du galvanomètre mesurant ce courant commande la rotation d'un vernier de condensateur ou d'un petit variomètre modifiant la fréquence de l'oscillateur dans le sens voulu.

On pourrait agir sur la constante de temps du système au moyen de « dash-pots » ou dispositifs analogues. Des moyens spéciaux devraient être employés pour éviter que le courant traversant le galvanomètre dépende de l'amplitude du signal pilote, au lieu de ne dépendre exclusivement que de la fréquence du courant pilote.

En comparant de tels systèmes avec les deux suivants, il est difficile d'en voir la supériorité.

3.4.2.2.3 *Synchronisateur thermique*

Un moyen simple et pratique, déjà proposé, consisterait à utiliser un oscillateur local à quartz piézo-électrique, dont la température serait fonction de la fréquence de l'onde incidente. Il serait facile d'agir sur la constante de temps thermique du système pour lui donner une valeur adéquate, fonction elle-même d'autres facteurs, si nécessaire. Le système, cependant recommandable par sa simplicité, n'a pas été utilisé par les Laboratoires LMT. Bien que pouvant, à la rigueur, satisfaire aux conditions de la technique radio-téléphonique actuelle, il a semblé moins souple en ce qui concerne l'adaptation aux progrès futurs que les synchronisateurs purement électriques décrits ci-après.

3.4.2.2.4 *Synchronisateur électrique*

En considérant le développement de la radio-technique pendant les années à venir, il est probable que le système de radiocommunications à bande latérale unique sera de grande utilité, non seulement pour la téléphonie, mais aussi pour la télégraphie, le fac-similé et la télévision. Nous avons donc pensé qu'il valait mieux débuter avec un système dont les principes généraux pourraient être étendus plus tard aux applications précitées.

Dans le cas de ces applications futures, il n'est pas suffisant que l'onde porteuse non transmise et celle régénérée soient synchronisées avec une précision de ± 15 p:s. Cette précision est également insuffisante dans le cas où il est nécessaire d'obtenir une qualité parfaite de la parole. Par exemple, s'il est nécessaire d'éviter la distorsion produite par de simples variations de phase, il sera essentiel que les oscillateurs soient *rigoureusement* synchrones et de phases très approximativement invariables. Cette condition élimine d'office, dans l'état actuel de la technique, toute méthode basée sur l'utilisation d'oscillateurs autonomes à chaque extrémité de la liaison. Elle écarte aussi pratiquement toute méthode mécanique et thermique d'utilisation d'une voie de fréquence pilote comme nous allons l'expliquer.

Dans la transmission par ondes courtes, même quand le signal se propage par une seule voie, les phases des raies composantes de la bande latérale présentent fréquemment une variation de part et d'autre de leur valeur normale, ceci étant dû au fait que la longueur de la voie de transmission n'est pas constante. Si la réception multiple par plus d'une voie n'est pas employée, il en résulte simplement un retard variable entre le transmetteur et le récepteur, c'est-à-dire que la distorsion due aux variations de phase de chaque raie composante est directement proportionnelle à la fréquence de la raie considérée.

Prenons le cas d'une bande latérale large de 20 000 p:s dont la raie centrale est de 20 méga-périodes par seconde, cela signifie que la valeur instantanée de la phase est constante à 0,1 pour cent près, pour toutes les composantes de la bande latérale et du signal pilote et pourra être suffisamment bien compensée par une simple correction de phase sans variation de fréquence proprement dite. Pour obtenir ce résultat, il est nécessaire que la phase de l'onde porteuse régénérée puisse suivre les variations de phase du signal pilote.

Ces fluctuations peuvent quelquefois être très rapides, en conséquence, il est essentiel que la constante de temps pour la synchronisation à la réception soit très petite, de l'ordre d'une petite fraction de seconde. L'on voit immédiatement qu'une si petite constante est sinon impossible, du moins difficile à obtenir par des procédés mécaniques ou thermiques. L'utilisation des procédés purement électriques simplifie considérablement le problème et permet d'obtenir des constantes de temps facilement réglables et assez courtes pour satisfaire à tous les cas rencontrés dans la pratique.

Bien que le système employé par les Laboratoires L. M. T. ne soit pas

celui d'une synchronisation parfaite, il est basé sur une méthode purement électrique qui pourra être perfectionnée plus tard, quand il sera nécessaire d'obtenir une synchronisation plus rigoureuse. Une autre condition nécessaire concernant la constante de temps, est de pouvoir varier sans que l'appareil retardé cesse de suivre exactement les fluctuations de phase et de fréquence. En tenant compte des conditions de transmission, la constante de temps doit être petite mais, d'autre part, pendant l'évanouissement du signal pilote, la constante de temps doit être suffisamment longue pour que l'oscillateur conserve sa fréquence et sa phase entre les limites nécessaires. Ceci, nous l'avons vu, ne peut être résolu qu'au moyen d'une constante de temps

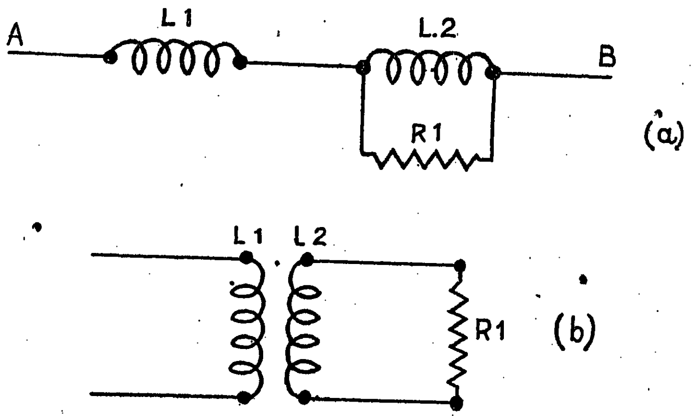


Fig. 6.

variable, automatiquement asservie, ce qui ne peut être réalisé commodément que par des procédés purement électriques.

En utilisant une réalisation mécanique, nous pouvons naturellement nous arranger pour que la constante de temps soit très longue pendant les périodes d'évanouissement, par exemple, en arrêtant le contrôle du condensateur d'accord ou du variomètre au moyen d'un débrayage ; mais de tels dispositifs opèrent lentement et dans tous les cas, comme il a été dit plus haut, la constante de temps ne peut être suffisamment réduite quand le niveau du signal pilote est élevé.

Il est aussi très difficile de concevoir un système simple pour faire varier la constante de temps au moyen de procédés thermiques.

Au contraire, les moyens purement électriques sont nombreux et commodes :

La solution la plus évidente est peut-être d'avoir un oscillateur à noyau de fer, dont la fréquence pourrait être changée en saturant par-

tiellement le noyau. Cette méthode, cependant, ne peut convenir qu'à des fréquences relativement basses.

Un second moyen possible serait d'utiliser le phénomène qui, en quelque sorte, caractérise n'importe quel oscillateur électrique : obtention d'une variation de fréquence par un changement de polarisation de la grille. Par cette méthode, cependant, il est difficile d'obtenir des changements de fréquence importants.

Une troisième méthode, utilisée précisément dans nos expériences, est illustrée par la figure 6, en 6 *a*). Une petite inductance L_2, shuntée par une résistance R_1 est connectée en série avec une autre inductance L_1. Il est clair que l'inductance résultante, entre les points A et B de l'ensemble, dépend de la valeur de la résistance R_1. Le même résultat s'applique évidemment aux circuits représentés en 6 *b*, si le coefficient de couplage entre L_1 et L_2 n'est pas égal à 1. Si L_1 est la bobine d'accord d'une triode oscillatrice, la fréquence de cet oscillateur dépendra de la valeur de R_1. La résistance R_1 peut maintenant être remplacée par la résistance filament-plaque d'une seconde triode dite stabilisatrice ou régulatrice, de sorte que la fréquence de la triode oscillatrice sera asservie à la polarisation de la grille de la triode régulatrice. C'est cette dernière méthode qui a été trouvée la plus convenable, en pratique, au cours des expériences décrites ci-après. Une triode stabilisatrice de faible résistance filament-plaque (environ 2 000 ohms) est employée. Lorsque la fréquence moyenne du superhétérodyne utilisé est de 500 kp:s, un changement de plus ou moins 5 pour cent peut facilement s'obtenir.

La question qui se présente enfin est de savoir de combien la fréquence de l'hétérodyne asservie doit changer. La réponse à cette question dépend évidemment du degré de stabilité de la fréquence porteuse supprimée et de la fréquence des premières hétérodynes du récepteur lui-même, stabilité observée pendant d'assez longues périodes de temps (par exemple 3 où 4 heures). Si un cristal piézo-électrique est utilisé pour stabiliser le premier oscillateur de battement du récepteur (supposé être du type « superhétérodyne ») et si le transmetteur lui-même est d'un type à bonne stabilité, l'expérience a montré qu'il est suffisant d'envisager une variation de plus ou moins 3 kp:s dans le cas le plus défavorable.

Si la fréquence intermédiaire du récepteur superhétérodyne (ou la première fréquence intermédiaire dans le cas d'un récepteur comprenant plus de deux détecteurs) est de 500 kp:s, cela correspond à une variation relative de l'oscillateur de plus ou moins 0,6 pour cent ; il

est clair, par conséquent, que la méthode de stabilisation expliquée ci-dessus permet amplement de satisfaire aux conditions requises.

Il faut maintenant asservir la polarisation de grille de la triode stabilisatrice décrite ci-dessus à la fréquence du signal pilote. La méthode d'asservissement dépend évidemment du degré de précision imposé dans le maintien de la constance de l'asynchronisme nécessaire. Dans les premières expériences, une première approximation seulement a été recherchée. Le circuit utilisé pour cela est montré sous une forme simplifiée dans la figure 7. « A » représente l'amplificateur à haute fréquence, la première hétérodyne de battement, stable mais

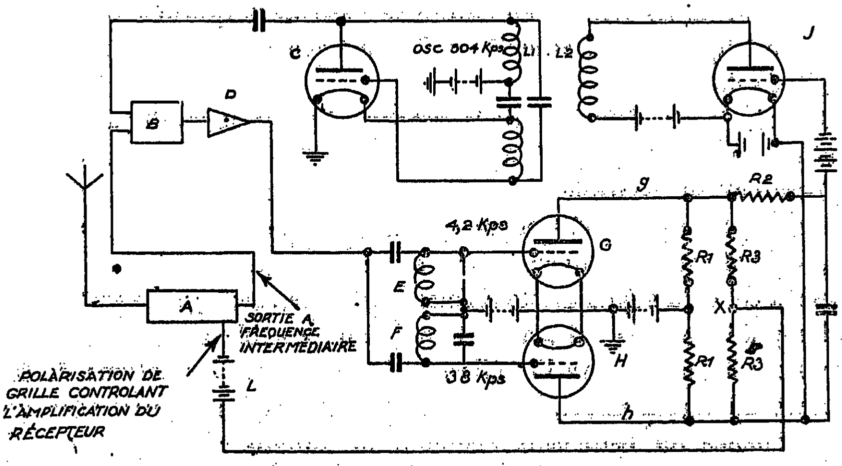


Fig. 7.

non synchronisée, le premier détecteur et l'amplificateur de première fréquence intermédiaire du récepteur.

Le courant résultant à 500 kp:s délivré par « A » est appliqué au deuxième détecteur B en combinaison avec une petite dérivation du courant produit par la deuxième hétérodyne synchronisée C, dont la fréquence normale est de 504 kp:s par exemple. Le battement normal à 4 kp:s fourni par le détecteur B est amplifié par un amplificateur basse fréquence à résonance D normalement accordé sur 4 kp:s. Le débit de l'amplificateur D est faiblement et également couplé aux deux circuits E et F accordés respectivement à 4,2 et 3,8 kp:s. Ces derniers circuits, sont connectés, ainsi qu'il est montré, aux grilles d'un système détecteur différentiel GH, bien équilibré. Les courbes de résonance des circuits E et F sont établies de façon que, exactement à 4 kp:s, les pertes des deux circuits soient égales et d'environ de 8 db plus grandes que les pertes au point de résonance. Si donc les deux fréquences fournies

au démodulateur B diffèrent exactement de 4 kp:s, des tensions égales seront appliquées aux grilles par les circuits E et F, donnant ainsi une force électromotrice nulle entre les deux anodes du détecteur différentiel GH. Supposons maintenant que, pour une raison quelconque, la fréquence de battement entre la fréquence de l'hétérodyne C et celle du signal pilote préalablement déplacée au voisinage de 500 kp:s par le système A, devienne légèrement plus grande que 4 kp:s. Le courant plaque du redresseur G excédra alors celui du redresseur H, de sorte que la tension de la polarisation négative de la grille de la triode J augmentera, accroissant ainsi sa résistance filament-plaque, ce qui a pour effet de diminuer légèrement la fréquence de l'oscillateur C, d'où tendance, par ce moyen, à reproduire le battement originel de 4 kp:s, entre la fréquence de l'hétérodyne C, ainsi synchronisé et la fréquence déplacée du pilote.

Le principe fondamental de la synchronisation apparaît maintenant clairement. Le détecteur différentiel GH, excité par le fréquencemètre différentiel EF, contrôle la polarisation du régulateur J, lequel asservit la fréquence de l'hétérodyne stabilisée C, de manière à assurer un asynchronisme constant de 4 kp:s entre la fréquence de cette hétérodyne et celle du signal pilote préalablement déplacée par le système A.

En pratique, il a été trouvé tout à fait possible au moyen de ces circuits, de contraindre l'oscillateur C à suivre les variations de fréquence du signal pilote, atteignant plus ou moins 5 kp:s, sans que la fréquence du battement résultant ne diffère jamais de plus de $\pm$ 15 p:s de la valeur normale de 4 kp:s.

La figure 7 montre aussi comment une constante de temps fixe est attribuée aux circuits de synchronisation. La résistance R_2 est d'environ 5 mégohms et le condensateur K est d'environ 20 μF, l'ensemble donnant donc une constante de temps de 100 s entre le circuit détecteur différentiel GH et la grille de la triode régulatrice J.

Considérons maintenant un autre facteur mis aussi en évidence dans la figure 7, facteur constituant une condition essentielle du parfait fonctionnement du système. Il est évidemment impossible, en pratique, de tabler sur des caractéristiques des triodes G et H exactement identiques. Il en résulte que, si les courants anodiques sont rigoureusement égaux pour un cas particulier correspondant à des tensions aux bornes des circuits E et F égales et d'une certaine valeur, les débits des deux détecteurs pourront ne plus être rigoureusement équilibrés quand cette valeur des tensions ne sera plus la même, quoique correspondant toujours à des tensions égales appliquées aux circuits E et F. En d'autres termes, il est difficile d'établir un détecteur dif-

férentiel dont l'équilibre, fonction de la fréquence incidente, soit indépendant de l'amplitude de l'oscillation incidente. Si même des caractéristiques identiques de détecteurs pouvaient être rigoureusement obtenues, l'équilibre parfait de deux courants plaque ne serait jamais atteint en pratique. Une certaine différence de tension est toujours nécessaire entre G et H, afin de provoquer la variation désirée de la fréquence de l'oscillateur C, de même que le régulateur à boules de Watt suppose, pour agir, que la vitesse de la machine contrôlée ne soit pas rigoureusement invariable.

Si donc la fréquence du pilote demeure invariable, mais si le niveau de ce signal pilote est accru (après une période d'évanouissement par exemple), la différence de potentiel entre G et H sera augmentée d'une certaine valeur, ce qui aura pour résultat de tendre à modifier la fréquence de C. La fréquence de C dépendrait donc, jusqu'à un certain point, non seulement de la fréquence du signal pilote, mais encore de son amplitude, ce qui doit être évité. Afin de surmonter cette difficulté, un régulateur automatique d'amplification a été ajouté. Il suffit pour cela qu'une différence de potentiel, fonction de l'amplitude du signal pilote (et non de sa fréquence), soit utilisée, pour réduire l'amplification du récepteur de telle façon qu'une très petite variation de cette différence de potentiel provoque une variation considérable du gain du récepteur.

Afin d'obtenir ce résultat dans le circuit représenté par la fig. 7, les résistances R_3 ont été ajoutées de façon que le potentiel du point médian X soit la moyenne des potentiels de G et de H. Quand la fréquence de battement est voisine de 4 kp:s, c'est-à-dire quand le point de fonctionnement voisin de l'intersection des deux courbes de résonance des circuits E et F est tel que les potentiels de G et de H varient au sens inverse, mais d'une quantité presque égale, dès que la fréquence varie légèrement, le potentiel de X dépendra presque exclusivement de l'amplitude du courant pilote et non pas de sa fréquence. X est réuni à l'amplificateur premier détecteur A via une contre-batterie de réglage de polarisation grille L.

Le régulateur d'amplification est en fait très semblable à celui utilisé couramment pour contrebalancer les phénomènes d'évanouissement dans les récepteurs usuels utilisés par les manufactures licenciées par les laboratoires L. M. T. pour le trafic radiotéléphonique, au moyen d'ondes courtes, quand le porteur est transmis en permanence et à puissance naturelle par rapport à celle des bandes latérales.

Par ce moyen, quand le niveau du signal pilote varie d'une valeur à peine supérieure au niveau des bruits, jusqu'à plus de 60 db au-

dessus de ce niveau, la tension à 4 kp :s, appliquée aux grilles E et F ne change que d'environ 10 pour cent. La constante de temps de ce régulateur automatique de gain est choisie assez courte pour pouvoir suivre les phénomènes d'évanouissement les plus rapides rencontrés en pratique (en négligeant évidemment l'évanouissement très rapide à plus de 20 p:s qui peut parfois se présenter, mais qui est généralement de faible durée). Une valeur convenable pour cette constante de temps a été trouvée aux environs de 50 millisecondes.

Il est maintenant évident que c'est seulement lorsque le signal pilote tombe au-dessous du niveau des bruits, que l'asservissement continu de l'oscillateur local est défaillant. Dans le cas où le signal pilote est réduit, au transmetteur, de 20 db par rapport à la valeur de crête de la bande latérale et où les conditions de propagation sont telles que le rapport signal/bruits de la parole est de l'ordre de 10 db (valeur minimum admissible pour qu'un circuit soit dit commercial), le signal pilote au récepteur est rarement tombé en pratique au-dessous du niveau des bruits pendant plus de 1/10e de seconde et jamais, en tous cas, pendant plus de 1/2 seconde. Ces chiffres, évidemment, ne sont basés que sur des résultats obtenus entre Madrid et Paris, pendant une période d'environ 5 mois en utilisant une longueur d'onde particulière (52 m) ainsi qu'un système particulier d'antenne à chaque extrémité. Il est évidemment difficile d'affirmer que les chiffres ci-dessus ont un caractère général. Il reste à le vérifier. Cependant la constante de temps du circuit contrôlant la fréquence constituée par la résistance R_2 et le condensateur K est suffisante pour bien maintenir la fréquence de l'oscillateur C dans les limites requises pendant les périodes d'évanouissement les plus défavorables d'une demi-seconde.

3.4.2.2.5 *Ensemble récepteur.*

Ayant ainsi réalisé un synchronisateur suffisamment précis pour les besoins actuels, la question suivante est le projet du récepteur. Il est clair qu'un récepteur idéal à bande latérale unique devrait tenir compte de la précision avec laquelle il est possible de maintenir la stabilité de fréquence du transmetteur, afin de réduire la largeur de bande traversant les circuits à fréquence téléphonique jusqu'à sa limite théorique d'environ 3 kp:s. Ceci peut être fait plus commodément en utilisant un récepteur à triple détection, la première fréquence intermédiaire étant de l'ordre de 500 kp:s et la deuxième fréquence intermédiaire étant voisine de 50 kp:s.

La première hétérodyne est autonome, mais stabilisée, alors que la seconde est asservie à la fréquence du signal pilote, d'une façon telle que la seconde fréquence intermédiaire ainsi obtenue ne varie jamais de plus de ± 15 p:s. Les filtres passe-bande à 500 kp:s ont une marge d'environ plus ou moins 4 kp:s en plus de la largeur nécessaire au passage de la bande latérale unique et du pilote (300 à 3 400 p:s) donnant ainsi une largeur de bande totale d'environ 12 kp:s ; le degré final de haute sélectivité est obtenu par un filtre passe-bande placé dans les circuits transportant la seconde fréquence intermédiaire (50 kp:s).

Etant donné que les fréquences de la bande latérale à cet étage ont été convenablement stabilisées, ce second filtre de bande peut être réglé avec grande précision, de manière à couper exactement les deux fréquences limitant la bande latérale unique désirée. Le récepteur utilisé à l'origine dans les essais décrits ci-après utilisait une seconde fréquence intermédiaire de 20 kp:s, au lieu de 50 kp:s, simplement parce que l'appareillage à 20 kp:s était disponible en magasin.

Le point suivant à considérer dans le projet d'un système complet de réception est celui de l'élimination, autant qu'il est possible, de l'évanouissement des courants vocaux débités par l'appareil. Pendant les périodes d'évanouissement sélectif, le niveau moyen de la totalité de la bande latérale ne change pas, en général, de manière considérable et le gain du récepteur reste par conséquent assez constant. Quand, par ailleurs, des périodes d'évanouissement spectral apparaissent, il est nécessaire de faire varier l'amplification du récepteur dans un sens tel et d'une quantité telle que l'évanouissement soit automatiquement compensé.

Il serait certainement recommandable d'utiliser deux ou plusieurs signaux pilotes ; par exemple, un signal pilote à chaque extrémité de la bande latérale unique. Le niveau moyen de ces deux signaux pilotes donnerait alors une bonne idée du niveau moyen de réception de toutes les fréquences comprises dans le spectre transmis et par conséquent de l'importance des phénomènes d'évanouissement spectral existants.

La différence de fréquence des deux signaux pilotes peut être choisie de telle façon que l'évanouissement sélectif ne change pas, en général, leur valeur moyenne d'une quantité appréciable. Si ce dernier niveau moyen est alors utilisé pour asservir l'amplification du récepteur radiotéléphonique, il semble probable que le débit téléphonique moyen restera substantiellement constant dans la plupart des cas. Cette méthode, cependant, n'a pas encore été expérimentée. Une autre

ligne d'attaque est basée sur le fait que, en général, l'évanouissement sélectif est de courte durée, alors que l'évanouissement spectral est de durée plus longue. Si deux régulateurs automatiques de gain sont utilisés conjointement, l'un à constante de temps courte pour la réception exclusive du pilote, ainsi qu'expliqué ci-dessus et l'autre à constante de temps de l'ordre de 30 ou plus pour la réception simultanée de la parole et du pilote, l'expérience prouve qu'il en résulte un niveau de parole assez constant.

Ce moyen de stabiliser le niveau de parole n'est pas parfait. Cependant, étant donné que les évanouissements spectral et sélectif ont des

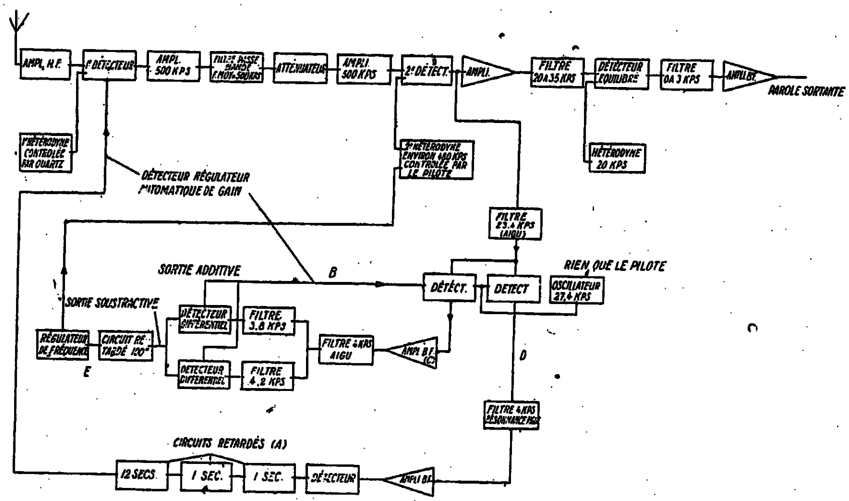


Fig. 8. — Schéma de principe d'un récepteur pour transmission à bande latérale unique.

durées différentes, le niveau ne pourrait jamais être absolument constant par aucun moyen. Le diagramme du circuit complet utilisé est montré par la figure 8. Les constantes n'ont pas, dans tous les cas, leur valeur optimum, souvent le matériel disponible en magasin influence le choix de tel ou tel appareil.

a) Le signal pilote utilisé correspond à une fréquence audible de 3 470 p:s, déplacé du même nombre de périodes par seconde que la bande téléphonique elle-même. Les deux raisons ayant déterminé cette position du pilote sont les suivantes :

L'énergie maximum de la parole se tient en-dessous de 500 p:s dans la partie à basse fréquence de la bande téléphonique, de sorte qu'il est recommandable d'espacer, autant que possible, le pilote de ces régions d'énergie maximum. Afin d'éviter une augmentation appréciable de la largeur de bande, une distance de plus de 400 à 500 p:s,

d'une extrémité de la bande latérale ne devrait cependant pas être excédée.

b) Le débit téléphonique obtenu à la sortie d'un récepteur ordinaire, quand on écoute un transmetteur tel que celui utilisé, donnera un spectre audible inversé et déplacé de 470 p:s. Un tel débit est pratiquement inintelligible, rendant ainsi le système relativement confidentiel, sinon absolument secret, puisqu'un détecteur oscillant dont la fréquence correcte a été réglée avec précision, pourra toujours rendre la parole intelligible, bien que troublée par un sifflement permanent à 3 470 p:s. La dernière objection s'applique aussi évidemment, à n'importe quelle forme simple de système secret basé sur une inversion ou un déplacement du spectre audible.

Le signal pilote est normalement à un niveau de 20 db en-dessous du niveau de surcharge du transmetteur supposé limité par la puissance de crête. Etant donné la très petite largeur de bande utilisée dans le récepteur pour sélectionner le signal pilote, le rapport signal à bruits, concernant le pilote, est à peu près le même que celui concernant la parole, ce dernier rapport étant au moins de + 10 db. Il est donc possible d'utiliser n'importe quel procédé de synchronisation ou de régulation d'amplification, dès que la bande téléphonique elle-même est reçue. La réduction nécessaire de la valeur de crête de la bande latérale pour éviter la surcharge inhérente à la présence du pilote est très petite (de l'ordre de 0,1 décibel), de sorte que, pratiquement, tout le gain résultant de l'adoption du système à bande latérale unique est obtenu.

Les régulateurs automatiques d'amplification sont similaires à ceux déjà utilisés dans les récepteurs commerciaux d'ondes courtes réalisés dans les manufactures bénéficiant des travaux des Laboratoires L. M. T. Le fonctionnement consiste simplement en un accroissement rapide de la tension de polarisation de grille d'un détecteur ou d'un amplificateur situé en tête du récepteur, dès que le courant continu débité par le dernier détecteur excède une certaine limite prédéterminée. Un changement correct de la polarisation de grille réduit le gain de la triode asservie jusqu'à ce que le niveau de sortie du récepteur soit à nouveau normal. Dans chaque cas, entre le détecteur de sortie et la triode dont le gain est contrôlé, on a intercalé un circuit à constante de temps d'une valeur appropriée à la fonction particulière à remplir. Les circuits A de la figure 8 sont constitués par trois cellules afin de donner une relation correcte entre la tension de sortie de l'amplification et le temps, cette courbe étant plus satisfaisante que celle

pouvant être obtenue avec une seule cellule. Les amplifications des divers détecteurs ou amplificateurs sont réglées de telle façon que la composante principale du bruit de fond dans le débit téléphonique terminal soit due au circuit de grille du premier amplificateur à haute fréquence. D'autre part, l'antenne est telle que, sauf circonstance anormale, la principale composante du bruit dû au circuit de la première grille soit occasionnée par des parasites statiques. La même remarque s'applique au circuit du signal pilote. Les amplifications sont telles qu'en l'absence de signal, les parasites statiques dans les conditions de force minimum commencent juste à affecter la triode régulatrice de fréquence et aussi les deux régulateurs automatiques de gain. Il n'y a aucun avantage à augmenter le gain au delà de ces limites et il est évident aussi que cet arrangement donne le meilleur rapport, entre le signal et le bruit, qu'il est possible d'obtenir avec l'antenne particulière utilisée et dans les conditions de transmission existantes.

Voyons maintenant quelles sont les limites de synchronisation. Même quand les signaux de réception donnent un rapport signal/bruit inférieur à celui caractérisant un circuit commercial, mais suffisamment bon pour transmettre des télégrammes de service, et même quand le pire évanouissement rencontré en pratique existe, la puissance du signal pilote peut encore être gardée à 20 db en-dessous de la puissance de crête de la bande. Malgré cela, la première fréquence intermédiaire (environ 500 kp:s) peut toujours être affectée d'environ plus ou moins 5 kp:s sans modifier la seconde fréquence intermédiaire de plus de ± 15 p:s. Cette limite donne incontestablement une marge suffisante. La fréquence du transmetteur change rarement de plus de 1 kp:s à partir de sa valeur normale, et une variation de 2 kp:s de la fréquence de l'oscillateur de battement contrôlé par quartz est rare, même quand on n'utilise pas de thermostat précis.

Le seul autre facteur variable est la fréquence naturelle de l'oscillateur à 480 kp:s, quand cette fréquence n'est pas contrôlée. Celle-ci peut être facilement maintenue à 1 pour 1 000 près de sa valeur normale, c'est-à-dire gardée constante à 500 p:s. Il est très désirable que le premier oscillateur de battement soit du type contrôlé par cristal de quartz :

a) Pour garder sa faible fluctuation de fréquence dans les limites requises.

b) Pour éviter des changements de fréquence dus à un changement dans la force du signal, quand cette dernière atteint un niveau élevé.

Compte tenu principalement de l'action du régulateur automatique de gain sur le premier détecteur, auquel l'oscillateur de battement est couplé, on constate un changement de la fréquence de ce dernier occasionnée par les variations d'intensité du signal reçu, à moins qu'un soin spécial ne soit pris pour les éviter. La nécessité d'un oscillateur contrôlé par cristal n'est pas une objection sérieuse à l'emploi du système, étant donné qu'un récepteur commercial n'est pas généralement employé pour plus de trois longueurs d'onde.

3.4.3 *Avantages du système.*

La méthode de transmission à bande latérale unique offre les avantages suivants :

a) l'encombrement de l'éther est réduit de 50 pour cent, ce qui permet de doubler le nombre de communications si la stabilité des porteurs supprimés le permet. Cet avantage, considérable dans le cas des communications par ondes guidées le long des fils ou dans le cas de radiocommunications par ondes longues, devient de moins en moins négligeable en ondes courtes, au fur et à mesure du développement du nombre des radio-communications.

b) Pour une qualité déterminée, c'est-à-dire un rapport signal sur parasites imposé, le gain d'une liaison à bande latérale unique sur une liaison équivalente à porteur et à bandes bilatérales naturelles est toujours au moins de 9 db et peut atteindre 21 à 29 db environ. Autrement dit, un radio-transmetteur à bande latérale unique de 10 kW est équivalent à un radio-transmetteur ordinaire de 80 kW dans les cas les plus défavorables et à un radio-transmetteur de 10 000 kW environ dans les cas les plus favorables à l'emploi du système.

L'éloquence de ces chiffres permet de se passer de tout commentaire, mais non pas des justifications suivantes :

Un radio-transmetteur est limité, principalement au dernier étage, soit par le courant de saturation ionique I_s, soit par la tension anodique instantanée de crête V_{max}, soit par l'échauffement D des anodes.

Si les derniers circuits anodiques sont calculés conformément aux règles de l'art, les deux premiers facteurs I_s et V_{max} limiteront *simultanément* la puissance efficace de crête à la valeur maximum.

$$P_{max} = \frac{I_s V_{max}}{4}. \tag{22}$$

Il s'agit de la crête de la courbe enveloppe à basse fréquence et non

de la crête de la sinusoïde haute fréquence enveloppée par les demi-sinusoïdes à basse fréquence.

Il ne faut pas oublier que l'intégrale de définition de la valeur efficace d'une fonction doit être prise entre deux valeurs limites comprenant un nombre entier en périodes. Or, nous avons vu que la période d'un courant modulé peut être en certains cas $\frac{2\pi}{M}$ mais en aucun cas $\frac{2\pi}{P}$.

C'est grâce à cette convention que l'on peut dire que dans un courant modulé à 100 pour cent la puissance de crête (basse fréquence), est égale à 4 fois la puissance du porteur, alors que la puissance instantanée de crête (haute fréquence), est en réalité égale à 8 fois la puissance du porteur.

Dans le projet d'un amplificateur, il faut néanmoins tenir compte de ce facteur 8, double du facteur habituel, pour calculer le courant de saturation capable de laisser passer la puissance instantanée de crête (haute fréquence).

Le facteur $\frac{1}{4}$ de l'équation (22) tient compte à la fois du rapport des valeurs efficaces aux valeurs maxima et du fait que le courant ne peut varier que de $-\frac{I_s}{2}$ à $+\frac{I_s}{2}$ en classe 1 ou de 0 à $+ I_s$ en classe 3, mais alors pendant une alternance sur deux, puisque le courant plaque ne peut devenir négatif.

Il est à remarquer que cette formule (22) est indépendante de la classe correspondant à la polarisation du tube, laquelle peut être quelconque ; elle est même indépendante de la nature des circuits utilisés.

Si le fonctionnement du tube est limité seulement, soit par des risques de claquage, soit par la saturation, c'est que l'impédance du circuit anodique externe n'est pas judicieusement adaptée à celle du tube et la puissance maximum utile est inférieure à celle donnée par la formule (22). Quoi qu'il en soit, si c'est cette puissance efficace de crête P_{max} qui limite la puissance de la station, la concentration de toute cette puissance dans une seule bande, au lieu de la répartir entre un porteur et deux bandes permet de gagner au moins 6 db. En effet, dans le système à bande unique, la puissance efficace de la bande peut atteindre P_{max} alors que, dans le système normal, la formule (19) montre que la puissance efficace utile $4 P_B$ ne peut dépasser :

$$P_{max} \frac{1}{\left(1+\frac{1}{K}\right)^2},$$

le gain est donc :

(23) $$20 \log_{10} \left(1 + \frac{1}{K}\right),$$

soit 6 db pour K = 100 pour cent, 20 db pour K = 11 pour cent, etc... Nous avons considéré, pour le calcul de ce gain, que la puissance utile dans le cas du système à porteur naturel est égale à 4 fois la puissance d'une bande P_B et non pas simplement à la somme $2\ P_B$ des puissances des deux bandes.

Cela suppose que le récepteur recevant les deux bandes avec leurs phases correctes, est muni d'un détecteur parabolique, lequel accuse une augmentation de puissance à la sortie de 6 db lorsque la puissance à l'entrée augmente de 3 db seulement (addition de la deuxième bande).

Or, dans le système à deux bandes et à courant porteur, le détecteur doit être linéaire pour éviter la production d'harmoniques 2, alors que dans le système à bande unique, le détecteur peut être parabolique. En toute justice, il faudrait donc comparer un système à deux bandes muni d'un détecteur linéaire au système à bande unique muni d'un détecteur parabolique *pour comparer à qualité égale*. Dans ce cas, le gain ci-dessus (6 db pour K = 100 pour cent, 20 db pour K = 11 pour cent, etc...) doit être majoré de 3 db en faveur de la bande unique.

Si, maintenant, le transmetteur est limité, non plus par la puissance efficace de crête P_{max}, mais par la dissipation anodique dépendant de P_{moy}, le système à bande unique présente un intérêt moindre.

En effet, supposons tout d'abord que le transmetteur ait un rendement anodique ρ constant, indépendant de la puissance amplifiée.

Dans ce cas, dans le système à bande unique, la plus grande puissance efficace dissipée appelée D_{max} est :

(24) $$D_{max} = P_{max} \frac{1-\rho}{\rho},$$

au contraire, dans le système à porteur naturel 100 pour cent et à deux bandes, la plus grande puissance efficace dissipée dépendra de la puissance moyenne P_{moy} et non de P_{max} d'où d'après les formules (7) et (8) :

(24 *bis*) $$D_{max} = P_{moy} \frac{1-\rho}{\rho} = 4P_B \frac{1-\rho}{\rho} \frac{2+K^2}{2K^2}.$$

La comparaison des formules (24) et (24 bis) montre donc que, si l'on admet (ce qui est défavorable au système à bande unique) que le ré-

cepteur est tel que la puissance utile dans le système ordinaire est 4 P_B, le gain en faveur de la bande unique en travaillant à dissipation constante est de :

$$(24\ ter) \qquad 10 \log \frac{2 + K^2}{2},$$

soit 1,76 db seulement pour K = 100 pour cent ; et 9,33 db pour K = 11 pour cent.

A qualité égale, nous devrions ajouter 3 db aux chiffres ci-dessus, puisque comme nous l'avons plus haut, la puissance utile dans le système ordinaire est dans ce cas 2 P_B et non pas 4 P_B. Cela conduit à un gain de 4,76 à 13 db (suivant la profondeur de modulation) inférieur au gain obtenu (9 à 23 db) quand le transmetteur est limité, comme dans toutes les stations puissantes, par la puissance de crête et non par la dissipation.

Il faut remarquer que le cas ci-dessus est purement théorique, puisque ρ n'est constant, ni dans les amplificateurs classe 1, ni dans les amplificateurs classe 3.

Considérons, par exemple, le cas particulier de la classe 3 dans laquelle le rendement est sensiblement proportionnel à l'excitation ; c'est-à-dire, à la puissance alimentation anodique ou encore à la racine carrée de la puissance utile.

Le calcul rigoureux, trop long pour figurer dans le présent mémoire, conduit à un résultat plus favorable au système à bande unique que le calcul simple précédent.

Au point de vue du transmetteur seul, le gain total résultant de l'adoption du système à bande latérale unique est donc compris entre 6 ou 9 et 1,76 ou 4,76 pour K = 100 pour cent, suivant que le transmetteur est limité par la puissance de crête ou par la puissance moyenne ou par un réglage intermédiaire. Ce gain croît rapidement pour des valeurs de K inférieures à 100 pour cent pour atteindre 20 ou 23 et 10 ou 13 db pour K = 11 pour cent. On pourrait d'ailleurs étudier les variations du gain avec K, car nous avons supposé jusqu'ici que K était constant (modulation par notes musicales de fréquences variables (Baudot à 5 fréquences) mais d'amplitude constante). Or, si K décroît pendant les pianissimo, ou la manipulation Morse, la puissance dissipée est encore inférieure à celle correspondant à la valeur de P_{moy} donnée par la formule (8) de sorte que le gain total, au point de vue du transmetteur, est très supérieur aux chiffres indiqués plus haut, quand il s'agit de petits tubes limités par la dissipation et fonctionnant en téléphonie et non pas en télégraphie modulée.

Ce gain supplémentaire serait de 3 db en faveur du Morse équilibré, comparé au Baudot à 5 fréquences.

En téléphonie, étant donné les nuances de la parole, ainsi que les intervalles entre les mots, les phrases, etc... pendant lesquels les anodes ne s'échauffent plus, on reste prudent en escomptant un gain supplémentaire de 10 db correspondant à une modulation maximum de 100 pour cent pendant 1/10 du temps.

Dans le cas des petits tubes limités par la dissipation et utilisés en téléphonie, le gain passe donc de 1,76 ou 4,76 db à 11,76 ou 17,46 db, de sorte que l'intérêt de la bande unique devient plus grand dans ce cas que dans celui des grandes stations.

Il est évident que les anodes doivent avoir une capacité calorifique suffisante pour supporter la puissance à dissiper sans qu'il en résulte de fortes variations de température.

Considérons maintenant le gain dû au récepteur. Etant donné la réduction de moitié de la largeur de bande occupée, on peut compter une réduction de 3 db des parasites si la largeur de bande du récepteur est réduite *proportionnellement* à la largeur de bande occupée dans l'éther, compte tenu de l'instabilité du transmetteur. Cela suppose aussi que la plus grande partie des bruits provient du battement d'une raie porteuse régénérée relativement forte avec les raies parasites ambiantes et non du battement intégré des raies parasites ambiantes entre elles. Dans le cas contraire on peut escompter une sur-réduction des parasites de 8 db (voir plus loin). Enfin, en cas d'évanouissement sélectif, les deux bandes étant gardées, lorsque l'effet Doppler vient modifier la symétrie des phases instantanées des deux bandes par rapport à celle du porteur, on ne peut plus considérer que les puissances des deux bandes s'ajoutent à la réception. Un calcul des probabilités justifie alors une perte de 3 db sur le signal basse fréquence. Cela revient à considérer que la puissance utile au transmetteur non seulement n'est plus 4 P_B ou même 2 P_B, mais seulement P_B moyenne de $P_B + P_B$ à $P_B - P_B$.

En résumé, le gain dû à l'emploi rationnel du transmetteur est compris entre 1,76 et 9 ou 14,76 pour K = 100 pour cent et atteint 20 à 23 db dans le cas extrême le plus défavorable au système ordinaire (K = 11 pour cent).

Le gain dû au récepteur est compris entre 3 et 6 db, suivant qu'il y a de l'évanouissement sélectif ou non. De sorte que le gain total maximum de 29 db sur une liaison se compose d'un gain fixe, inhérent au système, de 9 db (6 db sur l'augmentation du signal transmis

et 3 db sur l'adaptation du détecteur à la qualité voulue) plus 3 db sur la réduction des parasites et d'un gain variable pouvant atteindre 3 db pour le récepteur et 14 db pour le transmetteur. Tout ceci dans le cas où l'onde porteuse reste franchement au-dessus du niveau du bruit reçu par le récepteur, de telle façon que le bruit principal reçu soit dû à l'effet d'hétérodyne entre l'onde porteuse et les perturbations haute fréquence.

Si l'onde porteuse était d'un niveau comparable à celui des bruits, le gain dû à l'emploi de la bande unique serait d'ailleurs plus élevé que celui indiqué précédemment d'une quantité pouvant atteindre 8 db. Dans des circonstances particulièrement avantageuses, on pourra donc constater un gain total de 29 à 37 db en faveur du système à bande latérale unique.

c) Outre le gain sur le rapport signal/parasite d'une liaison, il convient d'apprécier la réduction considérable de la puissance moyenne d'alimentation de la station transmettrice correspondant au fait, avec des tubes en classe 3, de ne consommer de la puissance que lorsque l'opérateur parle et proportionnellement à la puissance de la parole. Le système 3,4 a donc tous les avantages à ce point de vue des systèmes 3.1.1.2,3.2 avec en plus, l'avantage de ne pas dépenser dans un porteur inutile les 2/3 de la puissance moyenne consommée par les anodes du transmetteur. Ce gain est particulièrement intéressant à considérer, quand le transmetteur est limité par sa puissance de crête, car dans ce cas, il n'intervenait pas déjà sous le paragraphe b). Là encore l'économie est réalisée au détriment de la constance de la charge du réseau.

d) Le système présente encore l'avantage de réduire les variations accidentelles dues à la propagation, puisque celles-ci n'ont plus de répercussion sur le porteur.

En cas d'évanouissement spectral de 50 pour cent en amplitude, le porteur est réduit de moitié, aussi bien que les bandes dans le système ordinaire, de sorte que le signal BF — produit de deux amplitudes réduites de moitié — tombe au quart de sa valeur.

Dans le système à bande latérale unique, le signal basse fréquence ne tombe qu'à la moitié de sa valeur.

En réalité, l'inconvénient n'est que relatif si l'on dispose d'un bon régulateur de gain à la réception, bien que ce dernier présente l'inconvénient de faire varier également le niveau des bruits de fond.

Sans cela, l'avantage (d) serait énorme, car il ne correspondrait pas

à un gain constant en décibels, mais à une réduction de moitié d'une perte évaluée en décibels. Un affaiblissement de 10 db serait réduit à 5 db, mais un affaiblissement de 100 db, serait réduit à 50 db, de sorte que le gain instantané résultant de l'emploi du système serait de 5, de 50 db, etc.

e) En cas d'évanouissement sélectif, l'avantage précédent est moins relatif, car il ne peut être compensé dans le système ordinaire par l'emploi de régulateurs de gain. En particulier, le terme à fréquence double provenant du battement des deux bandes entre elles et provoquant de la distorsion n'existe plus.

On se rappelle que cet avantage est particulièrement appréciable dans le cas de bandes inversées qui ne seraient pas rendues anharmoniques par écartement suffisant.

f) L'interférence causée par une bande latérale sur un récepteur accordé sur une voie adjacente est moins gênante, en général, que les notes stables de battement produites par deux ondes porteuses voisines.

Résultats. — On ne pourra mieux illustrer l'intérêt de la méthode de transmission à bande latérale unique sur ondes courtes qu'en présentant le résultat des essais conduits par M. A. H. Reeves et présenté aux personnalités officielles françaises intéressées le 21 mai 1931.

Ces essais, effectués entre le mois d'avril 1930 et le mois de mars 1931, se sont poursuivis, afin de vérifier les études théoriques ci-dessus, sur les trois liaisons suivantes :

a) Buenos-Aires à Madrid;

b) Essais locaux à Madrid (Pozuelo del Rey à Grinon, 80 km.) :

c) Madrid à Paris-Trappes. (Fig. 9, 12, 13).

Etant donné qu'aucun transmetteur à bande latérale unique n'avait été installé à Buenos-Aires, les essais sur cette ligne ont consisté principalement en expériences permettant de vérifier l'appareillage de maintien automatique du synchronisme, utilisant le porteur du transmetteur ordinaire à deux bandes latérales comme signal-pilote. La longueur d'onde utilisée était de 15 m.

Pendant la seconde série d'essais, c'est-à-dire ceux entre Pozuelo del Rey et Grinon, le système complet avec emploi du transmetteur provisoire précédemment décrit, fut utilisé. Quoique la distance ne fut que de 80 km (entre le transmetteur et les récepteurs espagnols de la ligne Madrid-Buenos-Aires), les conditions furent artificiellement

rendues plus ou moins similaires à celles existantes sur une ligne commerciale. Pour cela on utilisa une antenne directive à la fois du côté transmetteur et du côté récepteur, mais en les dirigeant dans les mauvaises directions. Par ce moyen, le champ et l'évanouissement furent trouvés être approximativement les mêmes que ceux de la ligne commerciale Madrid-Buenos-Aires. Pour ces essais locaux, une longueur d'ondes de 30 m fut employée.

Les séries finales d'essais entre Madrid et Paris eurent lieu de no-

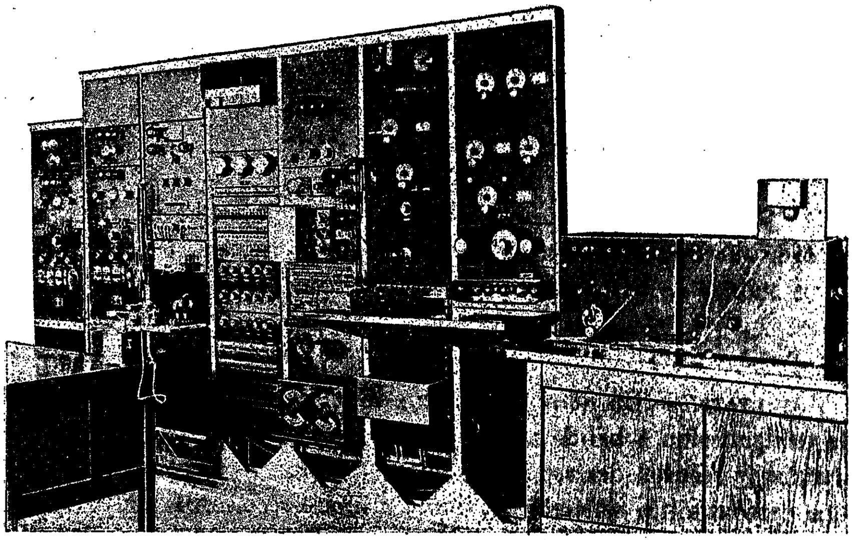


Fig. 9. — Récepteur à bande latérale unique employé dans les expériences entre Madrid et Trappes.

vembre 1930 à mars 1931, en utilisant le même transmetteur que dans les expériences locales de Madrid, mais sur des longueurs d'ondes de l'ordre de 30 à 52 m. Dans chaque cas, le choix des longueurs d'ondes ne fut influencé que par les conditions de transmission pendant les heures où les expériences furent possibles. Par suite des exigences du trafic, ces heures furent limitées presque entièrement à la période de 22 heures à 10 heures.

De Buenos-Aires à Madrid, la première série d'essais effectués avec un récepteur provisoire, donnèrent, entre la fréquence transmise et celle régénérée localement, une différence maximum d'environ 20 p : s, excepté pendant les périodes d'évanouissement anormales. Nulle tentative ne fut faite pour réduire la puissance de l'onde porteuse au-dessous de sa valeur normale. On pensa que ces résultats étaient suffisamment probants pour justifier l'espoir en des résultats intéressants.

D'autre part, le fait que la synchronisation adéquate ne pouvait pas être obtenue rigoureusement à cause des difficultés créées par les phénomènes d'évanouissement, montra la nécessité de perfectionner considérablement le premier appareillage utilisé.

Avant de commencer la seconde série d'essais *localement entre Pozuelo et Grinon,* les deux perfectionnements suivants furent adoptés :

a) Le premier oscillateur de battement du récepteur fut transformé en oscillateur du type à cristal de quartz ainsi que le montre la fig. 8.

b) Le régulateur automatique d'amplification B (fig. 8) sur le circuit du contrôle de la fréquence par le signal pilote fut perfectionné en augmentant le gain de l'amplificateur C, de telle façon qu'un niveau quelconque du signal pilote compris entre le niveau déterminé par ces essais locaux et le niveau à peine supérieur à celui du bruit, ait un même effet sur la triode régulatrice.

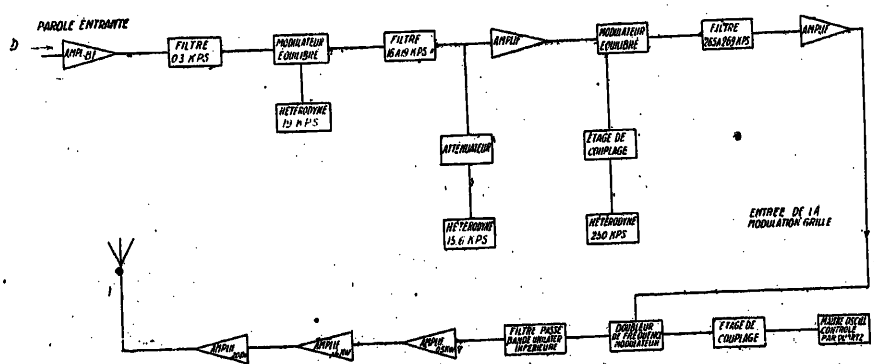


Fig. 10. — Schéma simplifié du récepteur à bande latérale unique de la fig 9.

Le circuit de sortie D de la voie du pilote contrôlant le gain de tout le récepteur à travers un circuit de constante de temps relativement grande n'avait pas encore été utilisé.

Premier Essai. — Synchronisme

Aucun essai de stabilité du synchronisme, pendant une période de longue durée, ne fut poursuivi pendant ces essais préliminaires, mais pendant des périodes d'une demi-heure de durée, une différence de 20 p:s, entre les ondes porteuses du transmetteur et du récepteur fut rarement dépassée.

Deuxième Essai. — Qualité de la parole

Sauf en de rares occasions, où le synchronisme ne fut pas assez bon, la qualité de la parole fut trouvée tout à fait satisfaisante ; en fait, comme il avait été prévu, la qualité fut meilleure pendant les conditions d'évanouissement sélectif, que celle donnée par le système à deux bandes latérales.

Troisième Essai. — Amélioration du rapport signal-bruit

Ce rapport fut mesuré, à la fois, dans les cas des deux bandes latérales et de la bande latérale unique, à la sortie du dernier étage à basse fréquence, par un indicateur de niveau standard. Une modulation à 1000 p : s. fut employée comme signal. Des évanouissements complets furent évidemment obtenus dans les deux cas de transmission à deux bandes latérales ou à bande latérale unique, de sorte que la mesure fut difficile. Une valeur moyenne fut estimée dans chaque cas au moyen d'un grand nombre d'observations. Une difficulté supplémentaire fut rencontrée. Quoique le passage d'un système de transmission à l'autre fut aussi rapide que possible, les conditions de transmission se modifiaient d'une manière très sensible pendant les périodes de changement.

Néanmoins, les résultats obtenus accusèrent un gain de 17 db pour la même puissance de crête dans l'antenne, en faveur du système à bande unique. Ce chiffre est un peu plus élevé que celui calculé théoriquement, soit 9 à 12 db si l'on travaille à puissance de crête déterminée, à profondeur de modulation invariable de 100 pour 100 avec détecteurs paraboliques dans les deux cas. La cause de cette différence n'est pas encore expliquée d'une manière satisfaisante.

Etant donné que le genre d'évanouissement est nécessairement différent dans les deux systèmes, il est clair que la valeur moyenne n'aura pas exactement la même signification dans un cas et dans l'autre. Il se peut que ce soit là la véritable explication.

Si le porteur naturel du système à deux bandes latérales est reçu à un niveau à peine supérieur à celui du bruit, le bruit total reçu dépendra aussi, d'une manière très appréciable dans ce système, de la largeur du spectre reçu.

Il est vrai que nous avons déjà estimé ce gain à 3 db dans le chiffre de 9 db indiqué ci-dessus dans l'hypothèse où la bande passante étant réduite de moitié dans le système à bande unique, la puissance des bruits reçus est également moitié (3 db) de celle des bruits captés par

le système ordinaire. Or, dans le cas de ces essais locaux à Madrid, la bande passante était de 20 kp:s, dans le récepteur ordinaire, et de 6 kp:s, seulement dans le récepteur à bande unique, ce qui correspond à un gain de :

$$10 \log \frac{20}{6} = 5{,}24 \text{ db},$$

au lieu de 3 db, soit un gain anormal de 2,24 db. Cependant, dans les essais dont il s'agit, le rapport signal/bruit, dans le cas des deux bandes latérales, ne fut jamais inférieur à 12 db environ, de sorte qu'il semble que cette dernière explication possible ne puisse s'appliquer, même partiellement.

Quatrième essai. — Qualité de la parole.

Cette qualité fut à nouveau trouvée satisfaisante et meilleure que lors du fonctionnement avec les deux bandes latérales naturelles.

Décrivons maintenant la troisième et dernière série d'essais entre *Madrid et Paris.*

Premier essai. — Synchronisme.

En l'absence du régulateur d'amplification D (fig. 8), le synchronisme ne fut pas toujours parfait, attendu que l'amplitude des phénomènes d'évanouissement (même en négligeant ceux de durée inférieure à la demi-seconde) rendait fréquemment inefficace le régulateur B. C'est afin de surmonter cette difficulté et aussi de réduire l'évanouissement de la parole délivrée, que le contrôle automatique D fut introduit ainsi que le montre la fig. 8. Par ce moyen, l'amplitude d'évanouissement permise sans perdre le contrôle par le signal fut augmentée jusqu'à une valeur totale telle que l'action synchronisante correcte ne cessa que rarement et pendant des périodes inférieures à un quart de seconde environ. La constante de temps du circuit E, fig. 8, fut tout à fait suffisante pour conserver la fréquence de l'oscillateur assez constante pendant ces courtes périodes. Au début de mars 1931, pendant les essais de stabilité sur les systèmes complets, durant dix nuits consécutives, la fréquence régénérée ne différa jamais de plus de 6 p:s, de la fréquence de l'onde porteuse supprimée, sauf deux ou trois fois correspondant à l'arrêt accidentel du transmetteur. Ce résultat expérimental fut définitivement supérieur à celui escompté.

Deuxième essai. — Qualité de la parole

La qualité de la réception parisienne fut toujours trouvée au moins aussi bonne que celle obtenue dans le cas d'utilisation des deux bandes latérales naturelles et très certainement meilleure pendant les mauvaises périodes d'évanouissement sélectif.

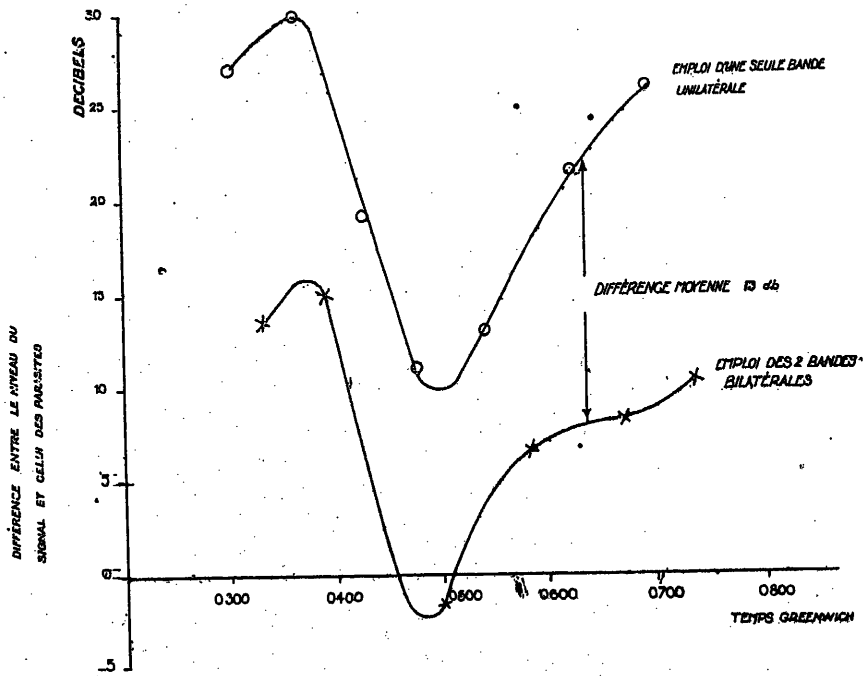


Fig. 11.

Troisième essai. — Rapport, signal/bruit

Dans les essais Madrid-Paris, un type perfectionné de signal fut employé au lieu d'une simple modulation à fréquence unique, on utilisa un vibrateur producteur de bruit donnant une énergie plus ou moins également distribuée dans la totalité du spectre téléphonique. On pensa que ce type de signal devait être un bien meilleur succédané de la parole au point de vue de l'évanouissement qu'une note musicale pure. Le résultat moyen d'un grand nombre d'observations montra un gain de 12 db sur le système de réception des deux bandes latérales naturelles, sans régulateur automatique d'amplification, et un gain de 13 db sur le même système de réception muni d'un régu-

lateur automatique d'amplification. Ceci correspond, en efficacité, à une multiplication de la puissance du transmetteur par un facteur de 16 à 20. Les puissances de pointe dans l'antenne furent réglées avec soin de manière à être les mêmes dans les deux systèmes. Le graphique comparant pendant toute une nuit les systèmes à deux bandes latérales et à une seule bande latérale est donné par la fig. 11.

Quatrième essai. — Evanouissement

Après que le régulateur supplémentaire d'amplification D eut été ajouté, l'évanouissement de la parole fut en général définitivement inférieur à ce que l'on pût obtenir de mieux en travaillant avec les deux bandes latérales naturelles et un régulateur automatique de gain. Ces perfectionnements montrèrent plus particulièrement (entre autres avantages du travail à bande latérale unique pendant les mauvaises périodes d'évanouissement sélectif), que le régulateur automatique de gain ordinairement employé sur les récepteurs à deux bandes latérales est tout à fait incapable de fonctionner convenablement pendant les périodes d'évanouissement sélectif. Quand l'onde porteuse s'évanouit, le gain du récepteur est ordinairement très considérablement augmenté, donnant à la sortie une parole à la fois forte et déformée.

Avec l'installation de réception à bande latérale unique montrée par la figure 8, l'évanouissement de la parole est au contraire très largement compensé. L'évanouissement sélectif est généralement assez rapide, de sorte que le régulateur de gain D, fonctionnant à travers un circuit à grande constante de temps, n'a pas le temps d'opérer. Ceci est évidemment la condition nécessaire étant donné que, pendant les phénomènes d'évanouissement sélectif, la puissance moyenne dans le spectre téléphonique est constante. Quand, au contraire, les phénomènes d'évanouissement spectral apparaissent, ils sont généralement d'une durée assez longue pour actionner le régulateur automatique d'amplification D, gardant ainsi, sensiblement constant, le niveau de la parole sortante. La seule manière d'obtenir une comparaison réellement précise entre les deux systèmes de compensation des phénomènes d'évanouissement est d'établir une longue série d'observations concernant une période de temps très étendue. Des résultats obtenus entre Madrid et Paris, il semble que l'évanouissement moyen, en utilisant le présent système à bande latérale unique, est environ la moitié de celui obtenu en utilisant la réception normale à deux bandes latérales naturelles. Pour des conditions d'évanouissement exceptionnellement mauvaises, l'amélioration est plus grande encore.

Cinquième essai. — Intelligibilité.

Aucune mesure précise de l'amélioration de l'intelligibilité ne fut tentée, mais pendant plusieurs nuits des comparaisons grossières furent faites en utilisant de courtes listes d'intelligibilité et en passant aussi rapidement que possible d'un système à l'autre. L'amélioration de l'intelligibilité fut évidemment d'autant plus marquée que le rapport signal à bruit était faible. Un résultat assez probant est que, lorsque le pourcentage d'intelligibilité dans le système à deux bandes latérales naturelles est de l'ordre de 20, il est ordinairement compris entre 70 et 80

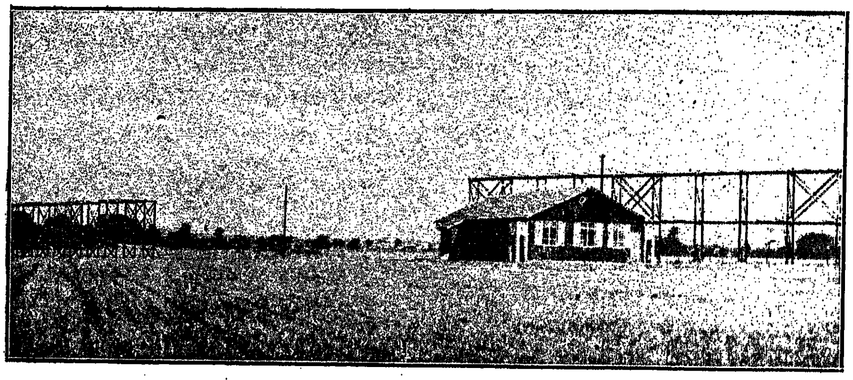


Fig. 12. — Station radio-expérimentale de Trappes.
Baraque et antennes de réception.

avec le système à bande latérale unique. En d'autres termes, le passage du système à deux bandes latérales au système à bande latérale unique est capable de transformer un circuit non commercial en un bon circuit commercial, pour une puissance de crête imposée au transmetteur.

Sixième essai. — Stabilité du système.

Ainsi qu'il a été mentionné ci-dessus, des essais continus de 2 à 3 heures chacun furent poursuivis pendant dix nuits consécutives. La parole fut utilisée à des intervalles réguliers pendant la durée des essais et les résultats indiquèrent un circuit parfaitement commercial, de bonne qualité, pendant toute la période considérée sans aucune interruption, sauf pendant une ou deux courtes périodes d'arrêt du transmetteur. Il ne fut jamais nécessaire de retoucher le récepteur pendant les essais, sauf pendant les réglages préliminaires au début de chaque

nuit. Cependant, dès qu'une différence de fréquence de 5 ou 6 p:s était observée (habituellement une fois au milieu de chaque nuit) l'oscillateur démodulateur était réaccordé afin de remettre les fréquences à l'unisson.

Qu'il nous soit permis de terminer cet exposé en en résumant l'ensemble par l'énumération des installations caractéristiques suivantes :

Etablissement d'une liaison radiotéléphonique Duplex à bande latérale unique sur ondes longues, entre New-York et Rugby. (Janvier 1925 à février 1926).

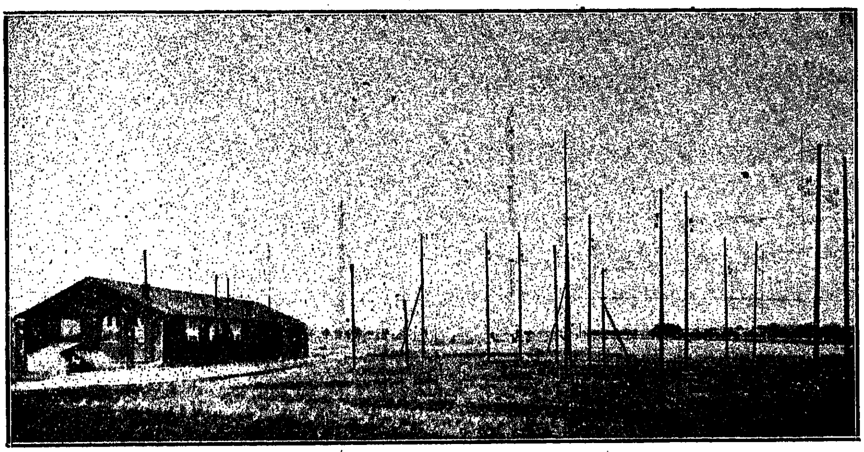


Fig. 13. — Station radio expérimentale de Trappes.

Liaisons sur ondes courtes avec les grands transatlantiques « Berengaria », « Majestic », « Olympic » utilisant divers procédés de radiotéléphonie Duplex, tels que suppression intermittente du porteur, travail à longueur d'onde unique permettant l'emploi d'une antenne unique pour la transmission et la réception. (Juillet 1929 à mars 1930).

Inauguration d'un service radiotéléphonique commercial entre Madrid et Buenos-Aires utilisant des systèmes à bandes inversées ou écartées. (12 octobre 1929).

Démonstration en simplex d'un système à bande latérale unique sur ondes courtes entre Madrid et Paris. (21 mai 1931).

Signalons encore l'utilisation commerciale de ces systèmes sur les lignes internationales suivantes :

Madrid-Buenos-Aires. — Bandes écartées. — Novembre 1929.

Madrid-Rio de Janeiro. — Bandes inversées simples. — Décembre 1931.

Madrid-Ténériffe. — Bandes écartées. — Avril 1931.
Madrid-Santiago. — Bandes écartées. — Mai 1931.
Buenos-Aires-Rugby. — Bandes inversées. — Mai 1930.
Buenos-Aires-New-York. — Bandes inversées. — Avril 1930.
Buenos-Aires-Rio de Janeiro. — Bandes inversées. — Décembre 1931.
Santiago-Bogota. — Bandes écartées. — Novembre 1931.
Rio de Janeiro-New-York. — Bandes inversées. — Décembre 1931.
S. S. Olympic-British Post Office. — Suppression intermittente du porteur Duplex à longueur d'onde unique. — Mai 1931.

Pour finir, je désire faire remarquer que le travail ci-dessus n'a pas la prétention d'être complet et qu'il existe certainement beaucoup d'autres aspects importants de la question d'emploi des bandes latérales qui n'ont pas été traités ici. En somme, les systèmes décrits sont principalement ceux avec lesquels nous nous sommes trouvés en contact directement dans notre travail ou indirectement.

Je désire aussi remercier MM. Depriester et Reeves pour l'aide considérable qu'ils m'ont donnée dans la préparation de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

Les principes généraux de la téléphonie par courants porteurs sont exposés en détail dans un article fondamental publié par MM. Colpitts et Blackwell dans le Journal de l'*American Institute of Electrical Engineer*, Vol. XL, p. 201, 1921.

R. A. Heising, « Modulation en Radio-Téléphonie » publié dans *Proc. Inst. Radio Eng.*, Vol. 9, p. 305-352, août 1921.

I. R. Carson, « Notes sur la théorie de la modulation » publié dans *Proc. Inst. Radio Eng.*, Vol. 10, p. 57, 1922.

A. F. Rose, « Applications pratiques dans le « Bell System » des systèmes télégraphiques et téléphoniques à courants porteurs » publié dans le *Bell System Technical Journal*, Vol. 2, N° 2, p. 41-52, avril 1923.

R. V. L. Hartley, « Relation entre l'onde porteuse et les bandes latérales », publié dans *Proc. Inst. Radio Eng.*, Vol. 2, p. 34, février 1923. Voir sur le même sujet : *Bell System Technical Journal*, Vol. 2, avril 1923, p. 90-112.

J. R. Carson, « Sur le rapport signal-parasites en radio-téléphonie ». *Proc. Inst. Radio Eng.*, Vol. 2, p. 271, juin 1923.

Arnold et Espenschied, « Sur la modulation », publié dans le *Journal de l'American Institute of Electrical Engineer*, août 1923.

Voir dans le *Bell System Technical Journal* d'octobre 1923, une discussion des avantages de la transmission à bande latérale unique.

R. A. Heising, « Sur la production d'une bande latérale unique pour la radiotéléphonie transatlantique », publié dans *Proc. Inst. Radio Eng.*, Vol. 13, p. 291, juin 1925.

E. M. Deloraine, « Téléphonie transatlantique », la Station du Post Office

britannique à Rugby ; *Bulletin de la Société Française des Electriciens*, 4e Série, Tome VII, p. 421-440, avril 1927.

E. Peterson et Clyde R. Keith, « Sur la modulation par la grille », publié dans le *Bell System Technical Journal*, p. 106, 1928.

F. M. Coolebrook, « Sur la réalité physique des bandes latérales ». *Experimental Wireless and Wireless Engineer*, janvier 1931.

E. M. Deloraine, « La Liaison radiotéléphonique Madrid-Buenos-Aires », publié dans l'*Onde Electrique*, Vol. 9, N° 106, p. 467, octobre 1930.

A. H. Reeves, « Le Système de Communications radiotéléphoniques à bande latérale unique appliqué aux ondes courtes », publié dans la *Revue Générale de l'Electricité*, tome XXX, nos 11 et 12, pp. 405-413 et 445-452, septembre 1931, et dans l'*Onde Electrique*, Vol. 10, n° 119, p. 476-512, novembre 1931.

P. Letheule, « La Radiotéléphonie à ondes courtes, à bande latérale unique » publié dans *Le Génie Civil*, tome XCIX, n° 9-29, août 1931, p. 476-512.

I. T. Hinton, « Sur les bandes latérales écartées dans les liaisons téléphoniques à ondes courtes ». *Electrical Communication*, Vol. X, n° 2, p. 60 à 66, octobre 1931.

A. Fleming, Critique de la « Théorie des Bandes en radiotechnique », *Nature*, Vol. 125, N° 3142, 18 janvier 1930.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

Traction

XXIII^e Congrès International de La Haye 26 juin-4 juillet 1932. 1 brochure de 21 × 28 cm., de 83 pages. 13 figures. Publiée par l'Union Internationale des tramways, chemins de fer d'intérêt local et transports publics automobiles. (Don du Secrétariat du Congrès).

6e question. — Exploitation par trolleybus.
Rapport de MM. Ch. Harmel et R. Vente.
I. Exploitation : résultats obtenus aux Etats Unis, en Angleterre, France, Allemagne, Autriche, Italie, Pologne, Belgique. Etudes économiques relatives aux trolleybus. II. Lignes aériennes. III. Matériel roulant en divers pays : puissance des moteurs ; vitesses et accélérations. Constitution de châssis. Ressort. Emplacement du moteur. Transmission. Equipement électrique Particularités des moteurs de trolleybus. Entretien d'un véhicule. Choix d'un trolleybus.

XXIII^e Congrès international de La Haye. — 26 juillet, 4 juin 1932. 1 brochure de 21 × 28 cm , de 45 pages. Publiée par l'Union internationale de tramways, chemins de fer d'intérêt local et transports publics automobiles (Don du Secrétariat du Congrès).

11e question. — Comparaison des transports en commun, chemins de fer d'intérêt local, tramways, omnibus automobiles. Le rail et la route.
Rapport de M P. Jourdain, administrateur délégué des Compagnies de chemins de fer secondaires et du Nord-Est.
Exposé de la question : conclusions des congrès de Madrid et de Washington. Réponses au questionnaire émanant des Sociétés allemandes, anglaises, autrichiennes, belges, danoises, françaises, espagnoles, italiennes, hollandaises, norvégiennes, polonaises, roumaines, suédoises, suisses, tchéco-slovaques, turques. Concurrence aux grands réseaux, aux lignes secondaires, aux tramways urbains. — Comparaison des transports urbains par tramway et par autobus sur le prix du kilomètre-voiture, comparaison des transports sur les lignes secondaires avec les transports sur route : prix du kilomètre-train, du kilomètre automotrice, du kilomètre autobus. Coût de transport de la tonne kilométrique sur rail, sur route.
Le rail et la route : voyageurs, marchandises. Réglementation générale des transports. Conclusions.

XXIII^e Congrès International de La Haye. 26 juin-4 juillet 1932. 1 brochure de 21 × 28 cm., de 8 pages, 7 figures. Publiée par l'Union Internationale des tramways, chemins de fer d'intérêt local et transports publics automobiles. (Don du Secrétariat du Congrès).

13e question. — Rapport sur le Zugspitzbahn (chemin de fer à crémaillère du Zugspitze, en Bavière).
Communication de M. A. Baschwitz.
Profil de la ligne. Locomotives à crémaillère. Funiculaire suspendu.

XXIII^e Congrès international de La Haye. — 26 juin-4 juillet 1932. 1 brochure de 21 × 28 cm , de 62 pages. 26 figures. Publiée par l'Union internationale de tramways, chemin de fer d'intérêt local et transports publics automobiles. (Don du Secrétariat du Congrès).

15e question. — Meilleures dispositions à adopter pour la carrosserie des automobiles des transports en commun, tant urbains que ruraux.
Rapport de M. Poncet, Ingénieur en chef attaché au service central du matériel et de la traction de la compagnie des chemins de fer de l'Est
En collaboration avec M. Métayer, sous-chef d'exploitation de la Compagnie des chemins de fer de l'Est.
I. Mode de construction des carrosseries d'autobus : charpente en bois ou char-

pente métallique, carrosserie indépendante, carrosserie solidaire du châssis, emploi des métaux légers, renseignements sur les types existants de charpentes métalliques entretien. Charpente mixte. Poids des carrosseries. — II. Aménagement de la carrosserie: capacité, nombre de classes détails d'aménagement intérieur. — III. Chauffage, isolement thermique, aération. — IV. Eclairage. — V. Dispositifs de sécurité.

Recherches physiques

The Present Status of Complex Angles in their applications to Electrical Engineering. (Le statut actuel des lignes trigonométriques hyperboliques dans leurs applications à l'électro-technique), par Arthur Kennelly. 1 brochure de 19 × 27 cm., de 44 pages, 42 figures. Editée par l'Institut des Ingénieurs électriciens du Japon, à Tokio. (Don de l'éditeur).

Conférence faite au Japon en novembre 1931.
Définitions, relations trigonométriques, applications à l'électrotechnique.

Sur les propriétés magnétiques des roches. par Gaston Grenet, Docteur ès Sciences. Une brochure de 15 × 23 cm de 85 pages, 13 figures, 2 planches. Bibliographie de 64 références. Editée par la librairie Masson et Cie, 120 boulevard Saint-Germain, Paris. (Don de l'Auteur).

Travail effectué à l'Institut de Physique du Globe de la Faculté des Sciences de l'Université de Paris. Historique Etudes critiques des méthodes de mesures de la susceptibilité des minéraux et des roches. Description des appareils. Exposé et discussion des résultats; conclusions principales. L'examen miscrocopique des couches minces montre que les valeurs de la susceptibilité s'explique bien par la teneur en magnétique; l'augmentation de la susceptibilité des roches après chauffage est en relation avec les modifications survenues dans les constituants.

Fortschritte der physikelischen und teschnischen Akustik (Progrès de l'acoustique physique et technique), par Dr Ferdinand Trendelenburg, à Berlin Siemensstadt. 1 ouvrage de 13 × 19 cm., de 131 pages, 81 fig. Editée par l'Akademische Verlagsgesellschaft M. B. H. à Leipzig, 1932. Prix 4,80 Bentenmark. (Don de l'éditeur).

Etude des phénomènes acoustiques, mesures relatives au son. Bruits et paroles, problèmes d'acoustique relatifs aux salles et aux bâtiments. Enregistrement du son, films sonores.

Mesurements of the cosmic ultra-Radiation in Northern Sweden. — Mesures de l'ultra radiation cosmique dans le Nord de la Suède par Axel Corlin. Une brochure de 22 × 29 cm. de 7 pages, 4 figures. Publiée, par l'Observatoire de Lund, en Suède (1932). (Don de l'auteur).

Extrait de la circulaire n° 6 du 25 mars 1932 de l'Observatoire de Lund.
Description des appareils utilisés Quelques nouveaux résultats tirés des mesures effectuées à Abisko en 1929-1930.

Notice sur l'existence d'un fuseau crépusculaire, par N. Nahabédian. 1 brochure 14 × 21 cm. de 26 pages, fig. 4. Editée par la librairie scientifique, Albert Blanchard, 3 *bis*, Place de la Sorbonne, Paris (1931). (Don de l'éditeur).

Etude du faisceau crépusculaire. Phénomène de réfraction et de réflexion totale des rayons solaires observé en Indo-Chine. Interprétation du phénomène.

Essai d'une Physique de l'Ether, par F. Prunier, 1 brochure 15 × 16 cm, 74 pages. Editée par la librairie scientifique Albert Blanchard, 3 *bis*, Place de la Sorbonne, Paris (1932). (Don de l'éditeur).

Ondes et forces. —Réflexions au sujet de la relativité et de la mécanique ondulatoire. Essai d'une théorie hydrodynamique de l'éther électromagnétisme. Lumière. Gravitation. Interprétation de la théorie des quanta.

AÉRONAUTIQUE

Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'air (Service des Recherches de l'Aéronautique) ; **Méthode Géométrique de Tracés de Profils d'ailes et de corps fuselés. Essai sur la viscosité en mécanique des Fluides.** Par Maurice GIRAULT, 1 brochure n° 1013 de 19 × 28 cm, de 60 pages, 21 figures.

Editée par les librairies Blondel la Rougery, 7 rue Saint-Lazare, et Gauthier-Villars, 55 quai des Grands-Augustins, Paris (1931) (Don des éditeurs).

Cette brochure comprend 2 parties : 1re partie. — Méthode Géométrique de Tracés de Profils d'Ailes et de Corps fuselés. — Après avoir rappelé les généralités sur les tracés des profils d'ailes et résumé la méthode générale de transformation conforme, l'auteur étudie la construction géométrique de la fonction choisie pour le tracé des profils.

2e partie. — Essai sur la viscosité en mécanique des fluides. — L'auteur examine les équations classiques du mouvement des fluides visqueux, l'équation du mouvement d'un fluide doué de viscosité dans le cas de fortes variations de vitesses, et le mouvement à deux dimensions d'un fluide incompressible.

DIVERS

The Autogiro : its characteristics and accomplishments. (L'autogire, ses caractéristiques et ses réalisations). Par Harold F. HITCAIRN. 1 brochure n° 1018 de 16 × 24 cm, de 6 pages, 9 clichés. Editée par la Smithsonian Institution, à Washington (publication n° 3085). Communiqué du Smithsonian Report of 1930 (pages 265-271) (Don de l'Institution).

Cette brochure donne une description sommaire des autogires de J. de la Cierva. Réalisation de la vitesse de descente verticale jusqu'à 3 m, 60 par seconde. L'auteur donne quelques indications sur la stabilité aux faibles vitesses, sur l'atterrissage, le départ. La vitesse en pleine marche peut atteindre 160 miles soit 256 km à l'heure.

Ten years gliding and souring in Germany. (Dix ans de vol et de planage en Allemagne), par Walter GEORGU, professeur à Darmstadt (Allemagne) Une brochure n° 1019, de 16×24 cm de 10 pages, 16 photographies et 16 cartes et schémas. Editée par la Smithsonian Institution, à Washington (publication 3086). Communiqué du Smithsonian Report for 1930 (pages 273-283) (Don de l'Institution).

Cette brochure donne le compte rendu des recherches poursuivies dans un but à la fois sportif et scientifique. On donne une description sommaire de différents prototypes de planeurs et on mentionne quelques records réalisés : hauteur, durée, distance.

The Eighth Wonder : The holland Vehicular Tunnel (La 8e merveille : le tunnel Holland pour véhicule.) Par CARL C. GRAY et H. F. HAGEN 1 brochure n° 1016, de 16 × 24 cm., de 30 pages, 30 photographies, 5 figures. Editée par la Smithsonian Institution à Washington (publication 3104). Communiqué du Smithsonian Report for 1930 (pages 577-607). Don de l'Institution).

Cette brochure donne une description du tunnel « Holland », nouveau tunnel destiné aux véhicules et passant sous le fleuve Hudson à New-York.

Le problème de ventilation de ce tunnel est traité dans cet article.

BAR-LE-DUC. — IMP. COMTE-JACQUET.

Le gérant : Alfred MAGNIER.

5e série, tome II, n° 22. Octobre 1932

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

Communications techniques et discussions (1) :

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

RECTIFICATIF ET COMPLÉMENT AU RENVOI DE LA PAGE 294 DU BULLETIN DE LA S. F. E. DE MARS 1932

(Discussion Rapport de M. Mauduit sur « la définition, la signification physique et l'emploi en électrotechnique des diverses inductances relatives à 2 enroulements »).

A la suite des observations qui nous ont été présentées par les auteurs intéressés nous signalons que le renvoi en question, dans la note de M. Mauduit, *doit être modifié et complété comme suit ;*

Le coefficient de dispersion σ utilisé d'une façon courante dans la théorie des moteurs d'inductions, a été introduit par M. Blondel dans une série d'articles parus en 1894 et 1895 dans l'*Eclairage Electrique* ; dans un article de l'E.T.Z., résumé dans l'*Eclairage Electrique* du 9 novembre 1895, M. Blondel a montré l'identité entre les deux définitions de ce coefficient,

$$\sigma = 1 - \frac{1}{\nu_1 \nu_2} \qquad \text{et} \qquad \sigma = 1 - \frac{\mathcal{M}^2}{\mathcal{L}_1 \mathcal{L}_2}$$

et dans un article du même numéro, intitulé « du rôle des fuites dans les moteurs à champ tournant », il a utilisé l'expression

$$\sigma \Omega \lambda_2$$

pour représenter la résistance R'_2 du secondaire correspondant au démarrage sous le couple maximum. Cette expression n'est évidemment autre que l'inductance de fuite rapportée au secondaire, telle qu'elle a été définie plus tard, vers 1906, par M. Boucherot dans ses cours autographiés à l'Ecole Supérieure d'Electricité et à l'Ecole de Physique et de Chimie de Paris, en attendant qu'il communique cette définition au grand public dans un article de la Société Internationale des Electriciens, en avril 1911.

Dans l'article ci-dessus, où il utilise cette expression, M. Blondel n'insiste pas sur sa signification et ne lui donne aucun nom.

M. Boucherot ayant un peu plus tard, comme il est dit plus haut, appelé l'attention sur l'intérêt qu'il y avait d'utiliser dans un grand

nombre de questions ces inductances de fuite, auxquelles il donna le nom *d'inductances totales de fuite rapportées à un enroulement*, l'usage s'est répandu, à juste titre, de les appeler, *inductances Boucherot.*

En suite à cette note, M. BOUCHEROT *nous a transmis la suivante :*

Je m'excuse d'abord de revenir encore sur ce sujet qui peut paraître oiseux à quelques-uns.

Personne n'a contesté, je pense, que dans sa théorie du moteur asynchrone, M. BLONDEL ait mis en vedette un coefficient numérique σ, relié aux coefficients v_1 et v_2 d'HOPKINSON par la relation $\sigma = 1 - \frac{1}{v_1 v_2}$ ni qu'il ait montré qu'en faisant $R'_2 = \sigma\Omega\lambda_2$ dans le rotor d'un moteur alimenté sous tension constante, on en obtenait le couple maximum.

J'ai proposé plus tard de mettre un peu d'ordre dans ces questions surtout en raison de l'abus que l'on faisait partout de l'expression self-induction tout court.

J'ai proposé de désigner :

1° sous la dénomination « *self- iuductance de fuites* » les grandeurs

$$\mathcal{L}_1 = L_1 - \frac{n_1}{n_2} M \qquad \text{et} \qquad \mathcal{L}_2 = L_2 - \frac{n_2}{n_1} M.$$

2° sous la dénomination « *inductance des fuites totales ramenées* »

$$\mathcal{N}_1 = L_1 - \frac{M^2}{L_2} \qquad \text{et} \qquad \mathcal{N}_2 = L_2 - \frac{M^2}{L_1}$$

les grandeurs sont évidemment reliées aux précédents coefficients de dispersion par des formules qui sont :

$$v_1 = \frac{L_1}{L_1 - \mathcal{L}_1} \qquad v_2 = \frac{L_2}{L_2 - \mathcal{L}_2} \qquad \text{et} \qquad \sigma = \frac{L_1}{\mathcal{N}_1} = \frac{L_2}{\mathcal{N}_2}.$$

Je n'ai jamais, personnellement, accolé mon nom à une inductance quelconque, si d'aucuns ont cru devoir le faire, il y avait peut-être là une raison d'ordre psychologique. Je leur conseillerais plutôt de prendre le nom de POTIER. Non pas que POTIER ait essayé de fixer l'attention des Electriciens sur ces inductances, mais parce qu'on les rencontre, sous forme algébrique explicite, dans des travaux de cet illustre savant, antérieurs à ceux de M. BLONDEL, en particulier dans « Diagrammes de fonctionnement des transformateurs et des moteurs asynchrones » extrait du cours autographié de l'Ecole des Mines, 1894-1895, 19e leçon un des mémoires de POTIER, réunis par les soins de M. BLONDEL (GAUTHIER VILLARS, éditeur, 1912). Cette édition est postérieure à ma propo-

sition (Bulletin de la S. F. E. avril 1911). à l'appui de laquelle j'ai montré que ces inductances prenaient une importance de plus en plus grande à mesure qu'on fouillait plus profondément les questions, en aidant d'ailleurs beaucoup à la compréhension *physique* des phénomènes, aussi bien s'il s'agit de l'étude du fonctionnement normal des transformateurs, des alternateurs (quand on cherche l'influence des harmoniques, des amortisseurs... etc...) et des moteurs, de l'étude de la commutation dans les machines à collecteurs (beaucoup de personnes croient encore que c'est la sef-induction de la spire en court-circuit qui intervient, tandis que c'est une inductance de fuites ramenées à la spire), que s'il s'agit des phénomènes de transition comme ceux résultant de la mise en court-circuit brusque d'un alternateur ou d'un moteur asynchrone.

C'est pourquoi j'ai réclamé un *sort* pour ces inductances, mais non pour moi.

SUR LA MARCHE DÉSÉQUILIBRÉE DES MOTEURS A COLLECTEUR ET LEUR ACCROCHAGE SYNCHRONE (1)

par P. Fourmarier S. M.
Ingénieur A. I. Lg.

Critique de l'hypothèse de M. Gratzmuller. — Marche avec excitatrice déséquilibrée électriquement. — Cas particulier; synchronisme. — Résultats d'essais. — Conclusion.

Dans le numéro de juin 1931 du Bulletin de la Société Française des Electriciens, M. Gratzmuller a signalé qu'il avait eu l'occasion d'observer la marche au synchronisme rigoureux de moteurs asynchrones avec excitatrice Blondel, les connexions étant cependant faites de la façon normale. M. Gratzmuller en a attribué la cause au couple d'hytérésis agissant en quelque sorte comme un couple synchrone, s'inversant au synchronisme.

Nous avons eu récemment l'occasion d'effectuer à l'Ecole Supérieure d'Electricité une série d'essais sur ce sujet, qui nous ont amené à une conclusion différente.

Si le couple d'hystérésis est la cause unique de cette marche synchrone, elle doit se produire même lorsque le circuit rotorique est ouvert, à condition que l'on entraîne le groupe par un moteur extérieur de façon à diminuer suffisamment le couple mécanique sur l'arbre. Or, sur les deux groupes essayés, comportant un moteur asynchrone de 4 kW, une excitatrice et un moteur à courant continu servant à entraîner l'ensemble, il n'a pas été possible de mettre en évidence une réelle synchronisation; des essais ont alors été effectués sur un moteur asynchrone de 8,5 kW accouplé à une machine à courant continu. Dans ce cas, avec rotor ouvert, il a été possible, en élevant la tension statorique à 115 pour 100 de la tension normale (133 V) de mettre en évidence l'existence de ce couple synchronisant ; mais la variation totale de puissance pouvant être obtenue en maintenant le synchronisme était certainement inférieure à 40 W soit 20 W de part

(1) Cette communication, présentée à la séance de juin 1932 de la 1re Section de la Société française des Electriciens, sera discutée à la Semaine de novembre 1932.

et d'autre, donc certainement inférieure à la puissance de frottements et de ventilation. De plus, cette synchronisation était assez délicate à obtenir parce que relativement instable.

Ce phénomène nous semble d'ailleurs s'expliquer aisément : d'abord, la puissance ainsi développée ne représente pas toutes les pertes dans le fer, mais seulement les pertes par hystérésis, puisque les pertes par courants de Foucault sont nulles dans le rotor au synchronisme ; en outre, on voit facilement que le couple synchronisant est relativement instable ; en effet, le couple d'hystérésis est dû au fait que, lorsque le flux statorique tourne par rapport au rotor, l'induction le long de l'entrefer suit le cycle d'hystérésis et que, devant

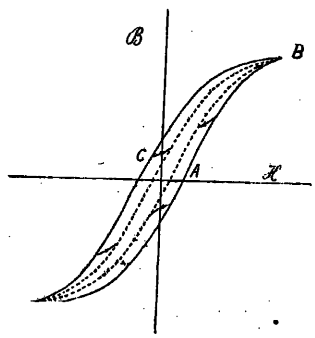


Fig. 1.

un pôle N par exemple, la zone en avant du mouvement est aimantée suivant AB, alors que celle en arrière du mouvement est aimantée suivant BC ; ce déséquilibre crée une attraction résultante provoquant l'entraînement. Lorsque le moteur tourne au synchronisme, l'induction est distribuée suivant la courbe limite du cycle. Supposons que, pour une cause fortuite, le couple diminue un peu; le rotor va se déplacer très légèrement, mais les inductions des points de la branche AB vont se déplacer, non sur le cycle primitif, mais sur des cycles secondaires et l'on voit sur la figure qu'à un petit déplacement, correspond une grande variation de la surface du cycle et par conséquent du couple.

On pourrait croire que, lorsque le rotor reprend sa position initiale, le couple se rétablit intégralement. Il semble cependant qu'il y ait toujours diminution du couple comme le montre l'expérience suivante : on entraîne l'aimant permanent d'un hystérésimètre Blondel de façon à produire, sur le tore d'essai, la distribution normale de l'induction, puis on l'arrête. Le système est alors absolument ana-

logue à un moteur asynchrone dont le rotor (tore) tourne au synchronisme, donc ne se déplace pas par rapport au flux (aimant). Si l'on fait alors osciller légèrement le tore autour de sa position d'équilibre, ce qui correspond à de petites oscillations du rotor par rapport au flux, on constate que, après avoir de nouveau arrêté le tore dans sa position initiale, le couple a toujours diminué, à moins que le couple initial soit assez faible (plus petit que 50 pour cent) du couple maximum.

On en conclut que, en pratique, le couple d'hystérésis est assez instable, ce qui explique pourquoi il est difficile de maintenir un moteur rigoureusement au synchronisme par le couple d'hystérésis seul, à moins que le couple retardateur soit très faible.

Les essais effectués sur les deux groupes ont, au conraire, montré que le circuit de l'excitatrice étant fermé, la synchronisation était facile et très stable dans des limites de couples beaucoup plus étendues (variation de 250 W au synchronisme).

Nous croyons dès lors que la synchronisation, si elle est favorisée par la présence du couple d'hystérésis, est due en majeure partie à une légère dissymétrie pratiquement inévitable du circuit rotorique ; ce phénomène n'est alors qu'un cas particulier de la marche de ces machines avec tensions au collecteur déséquilibrées, problème que nous allons étudier rapidement.

Marche avec excitation déséquilibrée electriquement.

Soit un moteur asynchrone accouplé à une excitatrice Blondel. Nous supposerons que les résistances des trois phases secondaires sont égales, mais que les balais ne sont pas espacés rigoureusement de 120° sur le collecteur.

Les trois tensions de pulsation $g\omega$ produites par l'excitatrice ne sont plus équilibrées; nous pouvons les résoudre en leurs deux composantes : d'ordre positif V_+ et d'ordre négatif V_-.

La f.e.m. V_+ agit exactement comme une f.e.m. induite en circuit équilibré, sauf que l'angle entre V_+ et la tension primaire U_1 n'est plus égal à l'angle γ de calage des balais sur le collecteur mais doit être déterminé comme suit : Soient a, b, c, les positions des balais sur le collecteur ; les tensions en triangle sont ab, bc, ca ; résolvant en leurs composantes symétriques, on trouve les triangles équilibrés a_+ b_+ c_+ et a_- b_- c_-. La composante d'ordre positif agit donc comme si les balais étaient calés en A B C différents de a b c (fig. 2).

Le système d'ordre négatif agit sur le secondaire du moteur asyn-

chrone; par rapport à ces tensions, le moteur asynchrone agit comme un moteur alimenté par le secondaire, à tension constante, mais à fréquence variable ; la pulsation du courant primaire est $g\omega$ et le glissement

$$-\frac{(1-2g)\omega}{g\omega} = 2 - \frac{1}{g}.$$

La puissance qu'il développe est donc :

$$P_- = \frac{V_-^2\left[\frac{1}{g}-1\right]\left[2-\frac{1}{g}\right]r_1}{\left[r_2\left(2-\frac{1}{g}\right)+r_1\right]^2+\left(2-\frac{1}{g}\right)^2\left[x_1+x_2\right]^2}$$

toutes les données étant rapportées au même enroulement.

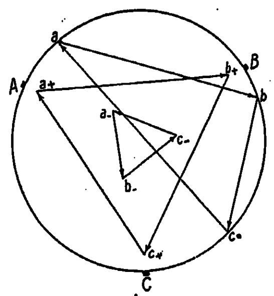


Fig. 2.

On voit que cette puissance est positive, donc favorise le mouvement, pour

$$\frac{1}{2} < g < 1.$$

Ceci explique pourquoi, lorsque les tensions rotoriques sont assez fortement déséquilibrées et que le couple positif n'est pas très grand aux faibles vitesses, le moteur tend à se stabiliser au voisinage du demi-synchronisme.

La puissance totale est la somme des puissances positive et négative.

Ces deux couples sont les seuls intéressants en marche normale ; toutefois, il existe deux couples supplémentaires pulsatoires ayant pour effet de faire osciller le rotor autour de sa position moyenne :

le couple produit par l'action du flux résultant d'ordre positif sur les courants d'ordre négatif ;

le couple dû à l'action du flux résultant d'ordre négatif sur les courants d'ordre positif.

Ces deux couples jouent au contraire un rôle prépondérant dans la synchronisation par déséquilibre.

CAS PARTICULIER. — SYNCHRONISME.

Dans ce cas, tous les courants rotoriques sont des courants continus; en outre, le flux d'ordre négatif dans le secondaire n'induit pas de courants dans le primaire du moteur puisqu'il est fixe par rapport à ce primaire.

Bien que les courants rotoriques soient continus, nous pouvons leur appliquer les règles des composantes symétriques, en considérant ces courants comme des valeurs instantanées de courants alternatifs de pulsation quelconque.

Soit Φ_r le flux résultant dans le secondaire du moteur ; nous appellerons *couple synchronisant* un couple qui prend naissance si l'on déplace le rotor d'un certain angle α par rapport au flux résultant et qui tend à ramener ce rotor dans sa position primitive par rapport au flux résultant. A ce titre, le couple d'hystérésis n'est pas un couple synchronisant.

Le flux secondaire Φ_+ fait, avec Φ_r, un angle β. Le couple positif est donc donné par $\Phi_+ \Phi_r \sin \beta$. Supposons que Φ_r se déplace par rapport au secondaire d'un angle α ; β va tendre à augmenter mais, par suite des propriétés des rotors à collecteur, les trois courants secondaires d'ordre positif vont simultanément se modifier de façon à faire tourner Φ_+ du même angle α. Le couple ne sera donc pas modifié et le rotor ne sera soumis à aucun couple synchronisant de part de Φ_+ et Φ_r ; le couple dû aux courants positifs est donc *rigoureusement asynchrone*.

Si Φ_- est le flux négatif, le couple qu'il développe est $\Phi_- \Phi_r \sin \beta'$; quand Φ_r se déplace d'un angle α par rapport au secondaire, Φ_- se déplace également de α mais en sens inverse ; le couple devient donc $\Phi_- \Phi_r \sin (2\alpha + \beta')$ et par conséquent, si $\sin (2\alpha + \beta') > \sin \beta'$ le rotor sera soumis à un véritable couple synchronisant qui tendra à le ramener à sa position initiale.

Ce couple varie entre $\Phi_r \Phi_-$ et $-\Phi_r \Phi_-$. La différence $2 \Phi_r \Phi_-$ donne donc la variation de couple que l'on peut admettre sans que la machine quitte le synchronisme.

Si nous supposons Φ_r constant, le souple synchronisant maximum est donc

$$C_s = \Phi_r \, \Phi_-.$$

Mais le couple maximum que l'on peut obtenir au synchronisme par décalage des balais est

$$C_m = \Phi_r \, \Phi_+ \qquad (\sin \beta = 1)$$

Donc

$$\frac{C_s}{C_m} = \frac{\Phi_-}{\Phi_+} = \frac{V_-}{V_+} = \varepsilon.$$

Le couple synchronisant maximum est donc égal approximativement au couple maximum que le moteur peut fournir au synchronisme multiplié par le degré de déséquilibre des tensions rotoriques.

Résultats d'essais.

Les deux groupes cités précédemment ont été essayés de la façon suivante : on les entraînait à l'aide du moteur à courant continu et on déterminait les deux limites de puissance entre lesquelles le moteur se maintenait au synchronisme, ce dernier étant observé à l'aide d'un ampèremètre à courant continu intercalé dans le circuit rotorique; la différence divisée par deux donnait la puissance synchronisante.

Cette puissance était, pour les deux groupes, respectivement 133 W et 105 W.

Les degrés de déséquilibre étaient 1,5 et 1,35 pour 100. Les puissances maxima au synchronisme 8050 W et 6420 W. Dans ces conditions, les puissances synchrones calculées seraient 120 W et 87 W.

Les excitatrices de ces deux groupes étaient munies de deux rangées de balais ; il a été également possible de créer des déséquilibres artificiels afin de vérifier plus exactement la formule précédente; la concordance était satisfaisante.

Conclusion

Il semble difficile, dans une machine à collecteur, d'obtenir un calage des balais beaucoup plus précis que ceux indiqués précédemment; la largeur des balais contribue d'ailleurs largement à augmenter ce déséquilibre. D'autre part, la puissance maximum au synchronisme est de l'ordre de grandeur de la puissance nominale du moteur; le couple dû au déséquilibre atteint donc aisément 2 pour 100 du couple normal, ce qui est notablement supérieur au couple maximum

rigoureusement synchrone que l'on peut obtenir par l'hystérésis seul.

Les conclusions, ainsi que les formules, seraient évidemment les mêmes pour un moteur à collecteur auto-compensé.

Des essais ont d'ailleurs été effectués sur un tel moteur et conduisent aux mêmes conclusions :

Déséquilibre : 5 pour 100. Puissance maxima au synchronisme : 5 600 W. Puissance synchronisante maxima : calculée 280 W, mesurée 325 W.

LES CELLULES PHOTOÉLECTRIQUES (1)

par M. R. Jouaust

Sous-Directeur du Laboratoire Central d'Electricité.

Le phénomène photoélectrique. — Les cellules photoélectriques. — Influence des gaz. — Le fonctionnement des cellules à vide. — Cellules à gaz. — Potentiel limite. — Fonctionnement intermittent. — Mesure et utilisation des courants photoélectriques. — Quelques procédés particuliers d'amplification de courant des cellules photoélectriques. — Emploi des cellules en radiothérapie. — Emploi des cellules pour les films sonores. — Emploi des cellules en photométrie. — Comparaison des lampes à température de coloration différente. — Les cellules à oxyde de cuivre.

Le phénomène photoélectrique.

En 1887, Hertz avait constaté que l'action de la lumière augmente la distance explosible correspondant à une différence de potentiel donnée.

L'année d'après, Hallwachs montrait que, lorsqu'on éclairait par un arc électrique un plateau relié à un électroscope, il se déchargeait s'il était chargé négativement, aucune action ne se produisant s'il était chargé positivement. Hallwachs put mettre en évidence que cette action était due aux radiations ultra-violettes de la source lumineuse.

On fut donc admis à énoncer le principe suivant : la lumière ultra-violette décharge les corps chargés négativement. Ce phénomène est connu sous le nom de phénomène d'Hertz-Hallwachs. C'est Stoletow qui le premier donna à l'étude de ce phénomène sa forme définitive.

Deux plateaux isolés étaient réunis aux deux pôles d'une batterie de piles. Lorsque le plateau réuni à l'armature négative est éclairé par de la lumière ultra-violette, un courant prend naissance dans le conducteur reliant la pile aux plateaux.

(1) Cette communication présentée à la séance du 8 février 1932 de la 2e Section du Comité d'administration de la Société française des Electriciens, sera discutée au cours de la Semaine de Novembre 1932.

On a finalement donné à ce phénomène étudié sous cette forme le nom de *phénomène photoélectrique*.

La pratique que nous avons des lampes thermioniques nous permet jusqu'à un certain point de nous rendre compte du phénomène.

Nous savons qu'il y a dans les métaux des électrons libres. Si ces électrons ont une certaine vitesse, leur énergie cinétique leur permet de sortir du corps qui les contient en franchissant la couche double constituée par une sorte d'atmosphère électronique qui entoure le corps et empêche la sortie des électrons. Dans la lampe thermoionique, c'est l'élévation de température qui donne, à certains électrons, une énergie cinétique suffisante pour sortir du corps.

Dans le phénomène photoélectrique, c'est la lumière qui peut leur donner cette énergie. Nous allons voir comment tout à l'heure.

Quant à la différence de potentiel que Stoletow créait entre les deux plateaux, elle est identique à la différence de potentiel que nous appliquons dans un diode entre le filament et la plaque. Il est nécessaire en effet que l'électron arraché à la substance se trouve dans un champ accélérateur, sans quoi, surtout si l'énergie cinétique qu'il possède n'est pas supérieure à celle qui était nécessaire pour sortir du corps, il serait de nouveau attiré vers ce corps. Nous venons de dire qu'il était nécessaire que l'électron ait une énergie cinétique pour sortir du corps. L'énergie d'une masse électrisée e peut toujours se mettre sous la forme eV, V étant une différence de potentiel. D'autre part la charge de l'électron étant une constante, le potentiel V caractérise cette énergie. C'est pour cela que, dans toutes les théories électroniques, les physiciens caractérisent les énergies par des potentiels exprimés en volts (2). On ne dira pas qu'un électron, pour sortir d'un métal, doit avoir une énergie W, mais une énergie V. On dira par exemple que, pour extraire un électron du platine, il faut une énergie de 6,3 V, de 4,54 pour le tungstène.

Comment maintenant la lumière peut-elle communiquer de l'énergie aux électrons ? Il est bien évident que la lumière est une énergie, et il est facile de concevoir qu'un faisceau lumineux puisse céder une partie de son énergie à un corps qu'il éclaire. Mais un fait très important (théorie des quanta de Planck), c'est que l'énergie cédée ne peut l'être que par quantités très petites mais finies, auxquelles on a donné le nom de quanta.

Une source de lumière monochromatique de fréquence ν, ne peut

(2) Depuis un certain temps, on emploie l'expression électron-volt.

céder son énergie que par multitudes de la quantité $h\nu$, h étant une grandeur universelle appelée constante de PLANCK.

En remplaçant la fréquence par la longueur d'onde exprimée en angströms, le quantum d'énergie est égal à

$$\frac{12\,350}{\lambda} e$$

e étant la charge de l'électron en COULOMBS.

On voit que dans ces conditions, si un électron absorbe un quantum d'énergie à une radiation de fréquence λ, il acquiert une énergie de

$$eV = \frac{12\,350}{\lambda} e.$$

Autrement dit un quantum d'énergie de radiation de longueur d'onde λ absorbée par un électron lui communique une énergie de V volts. Pour que l'électron puisse être arraché sous l'action de la lumière du corps qui le contient, il faut donc que cette énergie V soit supérieure, ou au moins égale à l'énergie V′ correspondant au corps donné. Par exemple pour le platine on doit avoir

$$\frac{12\,350}{\lambda} \geqslant 6{,}3$$

d'où λ

$$\lambda \leqslant \frac{12\,350}{6{,}3} = 1\,960 \text{ angströms}.$$

C'est une radiation qui se trouve dans l'ultra-violet presque à la limite des rayons qui peuvent traverser l'air.

On voit d'après cette théorie, due à EINSTEIN, pourquoi les radiations ultra-violettes sont les seules à produire le phénomène photoélectrique normal.

Lorsqu'un faisceau lumineux tombe sur un métal, la plus grande partie de la lumière est réfléchie, une petite quantité est absorbée, pénètre dans le métal et excite les électrons.

Mais comme l'épaisseur du métal dans laquelle a eu lieu l'absorption est finie, il en résulte que tous les électrons qui ont été excités ne peuvent sortir, car ils sont retenus par leur choc contre les atomes.

Il est évident qu'il y a d'autant plus de chance que les électrons puissent sortir, que l'énergie qui leur a été communiquée est plus grande.

Si le quantum d'énergie de la lumière $h\nu$ est très peu supérieur à l'énergie $h\nu_0$ nécessaire pour arracher l'électron, très peu sortiront. Au contraire si $h\nu$ est plus grand que $h\nu_0$, beaucoup d'électrons sor-

tiront du métal et après leur extraction ils auront une énergie égale à $h\nu - h\nu_0$ qui viendra s'ajouter à celle que communique le potentiel accélérateur. Le courant photoélectrique commence donc pour une certaine fréquence ν_0 ou si l'on veut pour une longueur d'onde λ_0, puis croît à mesure que la longueur d'onde diminue, à énergie lumineuse égale.

Le courant photoélectrique ne peut croître indéfiniment. En effet, le quantum d'énergie absorbée par l'électron h/λ augmente quand λ diminue. Le nombre d'électrons susceptibles d'être excités dans l'unité de temps par une puissance lumineuse égale à W est donc

$$\frac{W\lambda}{h}.$$

On voit qu'il diminue lorsque λ décroît. Le courant photoélectrique

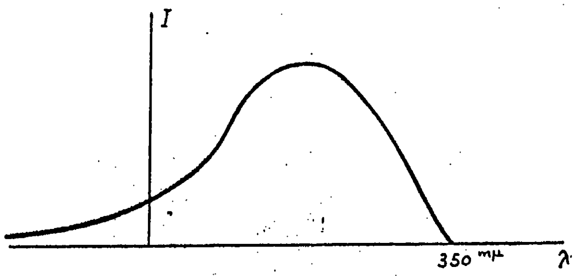


Fig. 1.

doit donc évidemment passer par un maximum pour une certaine valeur de λ.

Le courant photoélectrique, à énergie lumineuse égale, peut donc être représenté en fonction de la longueur d'onde par une courbe telle que celle de la figure 1, le début du courant commençant pour une longueur d'onde bien déterminée.

Le phénomène que nous venons d'étudier est le phénomène photoélectrique normal. Ne se produisant que pour des radiations ultra-violettes, il est de peu d'intérêt dans la pratique. Mais Elster et Geitel découvrirent, il y a une trentaine d'années, que les métaux alcalins présentaient une émission photoélectrique anormale qui se produit dans le spectre visible. C'est cette émission qu'on utilise dans les cellules photoélectriques. Cette émission se superpose à l'émission photoélectrique normale, de sorte que l'émission à énergie lumineuse constante d'un corps alcalin peut être représentée par une courbe comme celle de la figure 2.

La partie AB représente l'effet normal qui se prolongerait suivant BE. La courbe BCD représente l'émission anormale.

Ce qui distingue l'émission normale de l'émission anormale, c'est l'influence de la polarisation. Celle-ci n'intervient pas dans le phénomène photoélectrique normal. Au contraire, pour qu'il y ait émission photoélectrique anormale, il faut que le vecteur électrique ait une composante normale à la surface du corps éclairé.

Le vecteur électrique étant toujours normal à la direction de la propagation, on voit que, si la surface était parfaitement polie, un éclairement normal ne donnerait lieu à aucune émission photoélectrique. En

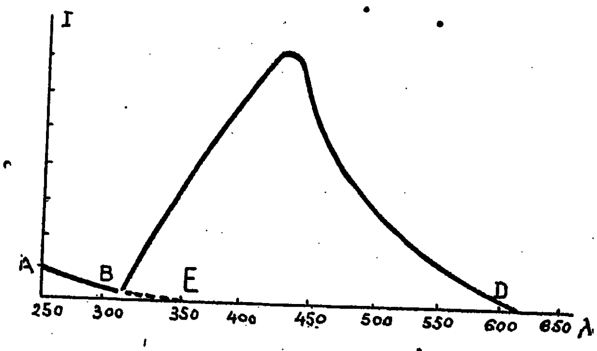


Fig. 2.

réalité les surfaces des dépôts alcalins ne sont jamais parfaitement polies et on a intérêt au contraire à faire en sorte qu'ils soient grenus.

Les cellules photoélectriques. — Les métaux alcalins étant très oxydables, le dépôt alcalin devra être placé dans le vide ou dans un gaz inactif.

Nous envisagerons d'abord le cas des cellules dans le vide.

La cellule se compose essentiellement d'un récipient en verre sur la paroi intérieure duquel on a déposé une couche du métal alcalin que l'on veut utiliser.

Un mince fil de platine traversant le verre permet de réunir cette couche sensible à un des pôles de la batterie fournissant le potentiel accélérateur.

A l'intérieur de l'ampoule pénètre une autre électrode qui joue le rôle d'anode. Cette électrode ne devant pas empêcher la lumière de tomber sur le dépôt photoélectrique, on lui donne la forme d'un anneau, d'un grillage, ou même on la constitue par un simple fil.

Nous donnons deux dessins (l'un en coupe représentant les formes les plus usitées de cellules).

C'est la forme sphérique qui a été utilisée la première pour la raison suivante.

Le courant photoélectrique est proportionnel au flux lumineux reçu par le dépôt. C'est pour cela qu'on peut utiliser les cellules en photométrie. Le facteur de proportionnalité dépend de la proportion de flux absorbé.

Si le flux est Φ, si on appelle ρ le facteur de réflexion du métal, le courant photoélectrique est proportionnel à

$$(1-\rho)\Phi.$$

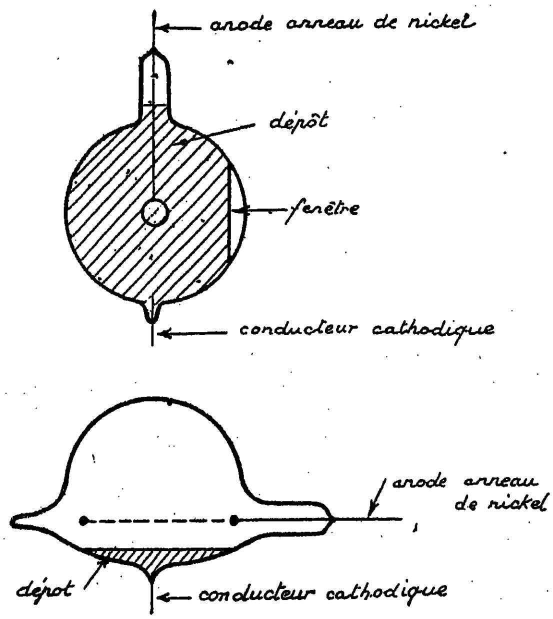


Fig. 3.

Dans le premier modèle le flux, réfléchi par le fond de la cellule, vient après réflexion rencontrer une autre partie sensible où il subit une nouvelle réflexion et une nouvelle absorption. On pourrait espérer qu'après des réflexions multiples il serait complètement absorbé.

C'est sur ce principe qu'est basée la réalisation du corps noir en physique. L'expérience a montré que l'avantage réalisé était illusoire et on utilise maintenant la deuxième forme qui a l'avantage d'être moins encombrante et de présenter une surface plus grande à la lumière incidente. On a construit également des cellules où le dépôt alcalin n'était pas fait sur le verre, mais sur une plaque métallique (cuivre ou nickel).

Le métal utilisé dans les cellules est en général un métal alcalin (lithium, sodium, potassium, rubidium, caesium).

Sauf pour le lithium qui ne peut être distillé avec des systèmes de verre, on emploie généralement pour constituer la couche sensible le procédé de distillation.

Le montage est celui de la figure 4.

On chauffe le récipient A, le métal alcalin distille, il vient de con-

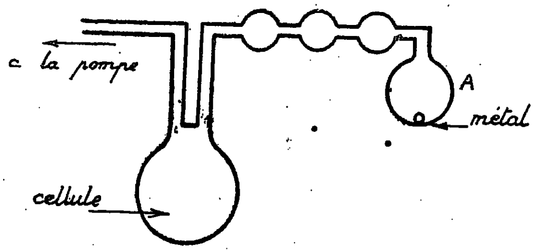


Fig. 4.

denser à l'état plus pur dans la première boule du tube de Liebig. En chauffant celle-ci, on le fait distiller dans la seconde boule et ainsi de suite, puis dans la cellule dont on chauffe la partie qui doit constituer

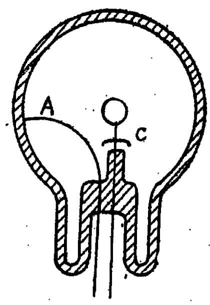


Fig. 5.

la fenêtre. Bien entendu les fils d'amenée du courant à l'anode doivent être protégés par un tube en verre.

Avec le caesium, dont le point de fusion est de 26°C, l'opération est très délicate.

L'opération terminée, on sépare au chalumeau les tubes et on ferme la cellule.

Zworykin a construit des cellules au caesium magnésium par le procédé suivant :

La figure 5 représente une coupe de l'ampoule à laquelle on donne à peu près la forme d'un triode ; un fil A est soudé à la surface et sort

par le pied, une autre tige métallique traverse ce pied et porte un anneau métallique.

Le support est rendu rigide par une colonne de verre que protège sans la toucher un petit chapeau.

Sur l'anneau on a soudé quelques morceaux de magnésium, et on l'a enduit d'une solution de trinitrure de caesium. La lampe vidée, on chauffe l'anneau par induction. Le magnésium vient se déposer sur les parois comme dans les triodes. En même temps le $CoeN^3$ s'est décomposé, l'azote entraîné par le magnésium est collé par lui au verre et le caesium vient se déposer sur le magnésium. La sensibilité d'une semblable cellule éclairée par une lampe au tungstène dans le gaz est de 2 micro-ampères par lumen.

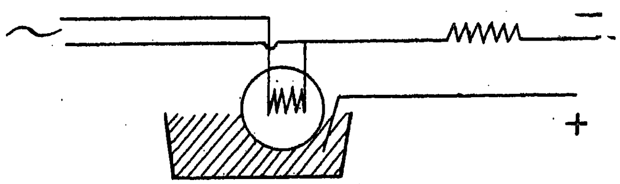


Fig. 6.

Pour les cellules au sodium, on peut utiliser le dépôt par électrolyse basé sur ce fait que le verre à haute température devient conducteur.

L'ampoule en verre à la soude est placée dans un bain de nitrate de soude fondu (312°C). A l'intérieur de l'ampoule est placé un filament de lampe à incandescence chauffé par du courant alternatif. En même temps une tension continue de l'ordre de 200 V est appliquée entre le bain et la lampe, le pôle positif étant au bain. C'est le courant thermionique qui ferme le circuit. Dans ces conditions le verre s'électrolyse et se recouvre intérieurement d'une couche de sodium (fig. 6).

Nous parlerons plus loin des cellules de caesium déposé sur métal oxydé.

Pour n'avoir plus à y revenir, nous dirons immédiatement comment on prépare ces cellules.

A l'intérieur d'une ampoule ayant la forme d'un triode, est placée une plaque d'argent oxydée ayant la forme d'un demi-cylindre et une tige de nickel est placée dans son axe, servant d'anode. Des conducteurs métalliques traversent les pieds et arrivent à un culot identique à celui de lampes triodes (Il y a donc deux broches inutiles).

A l'intérieur est placée une boule de chlorure de caesium et de calcium qu'on chauffe. Le caesium vient se déposer sur l'argent oxydé.

On chauffe au four, il se produit une réaction avec formation d'un oxyde de caesium recouvert d'une couche monomoléculaire de caesium.

D'après CAMPBELL, la couche d'oxyde doit correspondre à une épaisseur d'environ 10 molécules d'oxygène, et l'argent oxydé possédant les couleurs des métaux oxydés doit être bleu. La difficulté de la fabrication réside dans ce fait que la quantité de caesium ne doit pas être trop grande.

Influence des gaz. — On sait que sur tous les métaux, il y a un dépôt de gaz qui se trouve dans un état spécial. On dit que le gaz est adsorbé.

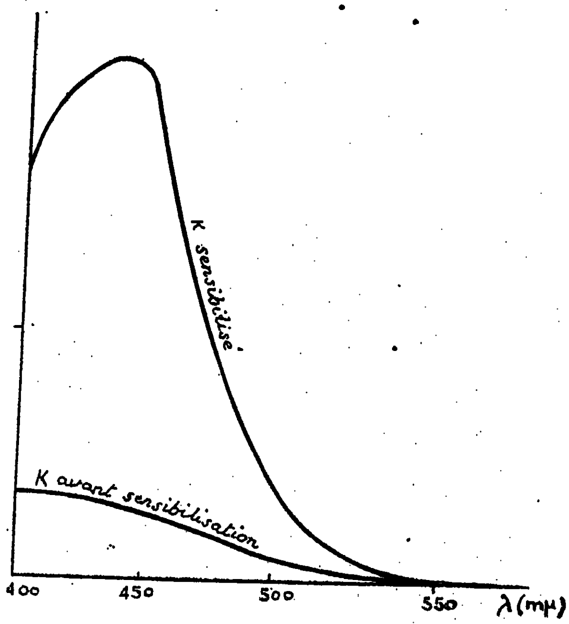


Fig. 7.

Il est absolument impossible de débarrasser complètement un dépôt alcalin de la couche de gaz qui le recouvre. Mais on peut arriver à rendre cette couche plus ou moins importante et les résultats obtenus sont tels qu'on peut conclure que, si la pellicule de gaz adsorbée n'existait pas, l'émission photoélectrique anormale n'existerait pas non plus, c'est-à-dire que les cellules photoélectriques seraient insensibles aux radiations visibles.

On a donc cherché à augmenter la sensibilité des cellules en augmentant l'épaisseur de la couche gazeuse par le procédé suivant. Lorsque le dépôt alcalin a été effectué, on remplit la cellule d'hydro-

gène à la pression de quelques millimètres et pendant une minute on fait passer une décharge électrique dans le métal alcalin servant de cathode. On avait pensé au début qu'il se formait un hydrure de potassium. En réalité c'est certainement l'importance de la pellicule adsorbée qui joue un rôle dans cette sensibilisation.

La figure 7 montre l'augmentation de sensibilité obtenue par ce procédé.

On voit, par ces courbes, que le maximum de sensibilité de la cellule est atteint pour une longueur d'onde d'environ 450 mμ (3).

Ne perdons pas de vue que toutes ces courbes sont tracées à flux lumineux égal pour toutes les radiations.

Mais les sources lumineuses que nous employons ne rayonnent pas la même énergie pour toutes les radiations. Pour le soleil le maximum d'énergie rayonnée correspond à 550 mμ. Mais pour nos sources artificielles, le maximum d'énergie rayonnée se trouve en deçà du spectre visible, dans l'infra-rouge.

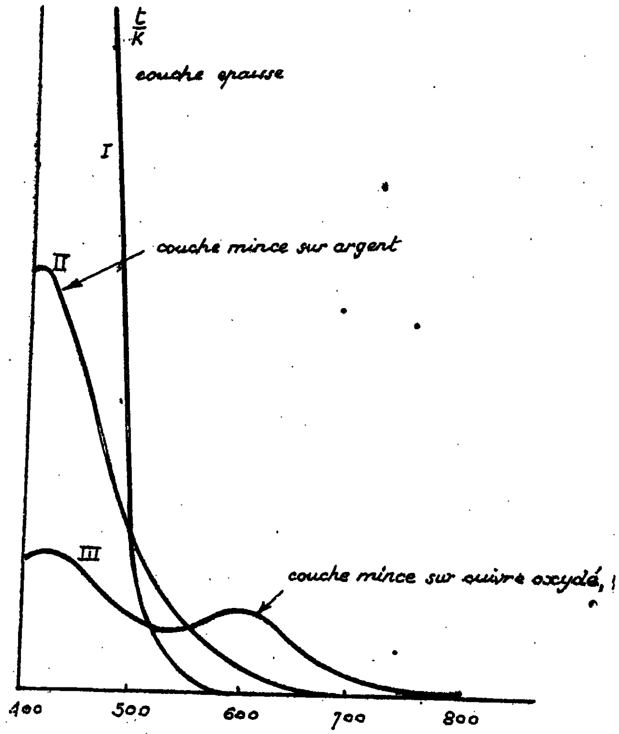
Ainsi, pour la température de 3 000° K, la source de température la plus élevée que nous utilisions, (lampe d'appareil de projection pour cinéma) on a :

Longueur d'onde. mμ	Energie rayonnée Nombres proportionnels
400	17,6
450	37
500	63
550	93
600	125
650	150
700	181

C'est-à-dire que l'énergie lumineuse est surtout rayonnée par ces sources dans les régions du spectre pour lesquelles la cellule est peu sensible. Il y avait donc intérêt à réaliser des cellules plus sensibles dans les régions de grande longueur d'onde.

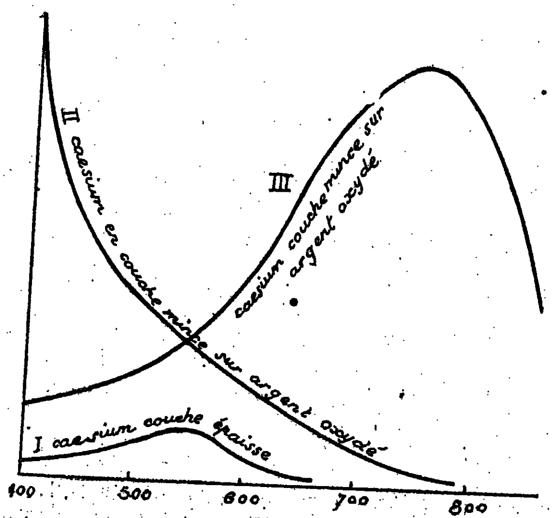
On est arrivé dans ces dernières années à des résultats intéressants en utilisant, non plus des couches épaisses de métal alcalin, mais de très minces couches presque invisibles sur des métaux. La nature du courant photoélectrique dépend, non seulement du métal alcalin, mais aussi du métal sur lequel il est déposé.

(3) D'après Rijunoff (*Zeitschrift für Physik*, 29 août 1931), la sensibilité passe par un maximum pour une teneur en hydrogène donnée, puis décroît.



t/K
couche épaisse
I
couche mince sur argent
II
III
couche mince sur cuivre oxydé
400
500
600
700
800

Fig. 8.



II caesium en couche mince sur argent oxydé
III
caesium couche mince sur argent oxydé
I caesium couche épaisse
400
500
600
700
800

Fig. 9.

La figure 8 donne une courbe du potassium.
1° en couche épaisse sensibilisée ;
2° en couche mince sur de l'argent
3° en couche mince sur du cuivre oxydé.
La courbe II indique déjà une sensibilité plus grande dans les

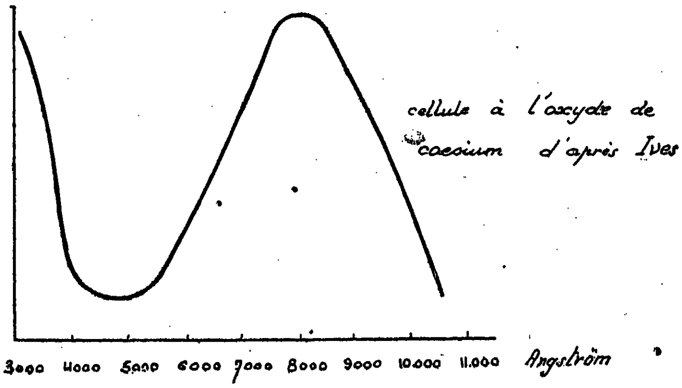


Fig. 10.

grandes longueurs d'onde, la courbe III sur cuivre oxydé montre un deuxième maximum dans les régions de grande longueur d'onde.

Plus intéressante encore est la figure 9 relative au caesium.

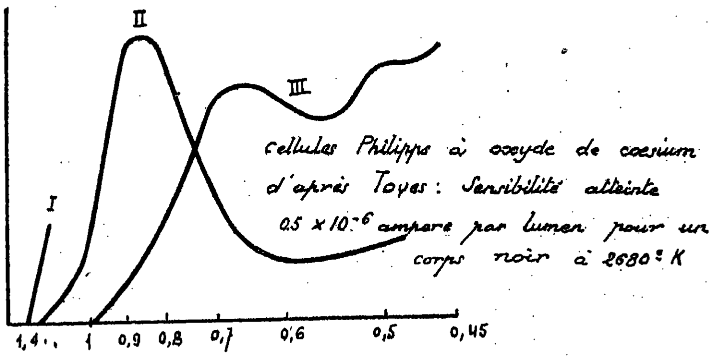


Fig. 11.

On voit courbe I, la sensibilité du caesium en couche épaisse, II, la sensibilité du caesium en couche mince sur argent oxydé et III la sensibilité du caesium sur argent oxydé. La manière dont avait été réalisée l'oxydation n'était pas la même dans les deux cas (Les auteurs ne donnent aucun autre renseignement). On voit que dans un cas le maximum est dans l'ultra-violet et dans l'autre dans le rouge.

Nous donnons également d'après Ives (fig. 10). (*Journal of the Op-*

tical Society of American, septembre 31), la courbe de sensibilité dans le spectre d'égale énergie d'une cellule à caesium oxydé. On voit qu'elle présente son maximum de sensibilité à la limite du spectre visible et présente encore une grande sensibilité dans l'infra-rouge.

Il en est de même des courbes de sensibilité de cellules Philipps à oxyde de caesium d'après Toves (fig. 11) *Zeitscherift für technische Physik* n° 11, 1931.

Comment expliquer ces phénomènes photoélectriques anormaux avec maximum de sensibilité dont la position varie avec la nature de la couche sensible ?

Déjà nous pouvons prévoir que l'existence d'un maximum doit correspondre à un phénomène de résonance.

D'autre part nous avons déjà vu que le fait de traiter par l'hydrogène la couche de potassium augmente beaucoup la sensibilité de la cellule.

Il est à peu près certain que, même lorsqu'on n'a pas traité spécialement le métal alcalin, il a absorbé une certaine quantité de gaz (H ou O), et on peut admettre que dans tous les cas, à côté du métal alcalin électropositif, se trouve un corps électronégatif et que c'est la présence de ce corps qui a pour effet de diminuer le travail de sortie des électrons du métal alcalin en provoquant le phénomène de résonance auquel nous avons fait allusion.

Pour aller plus loin, les physiciens ont dû faire appel aux théories les plus récentes de la physique, la mécanique ondulatoire de Louis de Broglie.

Nous exposerons sommairement une théorie due à Fowler. Sans nous prononcer sur sa valeur, nous pensons que sa connaissance peut être utile pour des recherches entreprises pour la construction de nouvelles cellules (4).

Fowler suppose que la présence simultanée d'un corps électropositif et d'un corps électronégatif a pour effet de créer une répartition spéciale des potentiels dans la couche sensible.

Ainsi, les potentiels dans le cas du caesium sur argent oxydé, c'est-à-dire d'après Fowler sur une série de couches alternatives électropositives et électronégatives, Ag, O, C_s, O, C_s, seront représentées par le graphique ci-joint (fig. 12).

(4) L'exposé complet des théories proposées pour expliquer les phénomènes photoélectriques dans les couches minces a été fait par Dunoyer, *Mémorial de physique*, fascicule XX, 1932.

Il y a entre A et B ce que FOWLER appelle une vallée de potentiel.

S'appuyant sur la mécanique ondulatoire, il démontre que la sortie des électrons est facilitée si la largeur de cette vallée est un multiple de la longueur d'onde associée à l'électron qui peut former dans cette vallée des ondes stationnaires.

Il faut donc, pour avoir le maximum d'émission que l'on ait

$$\lambda = \frac{2d}{n},$$

λ longueur d'onde associée à un électron, n nombre entier.

Or, en vertu de la mécanique ondulatoire, la longueur d'onde associée à un électron en mouvement est

$$\lambda = \frac{h}{mv},$$

h constante de PLANCK, m masse, v vitesse de l'électron.

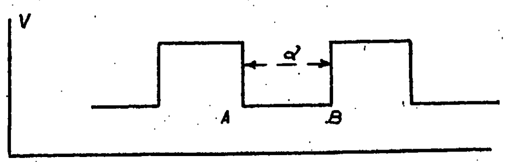


Fig. 12.

La vitesse des électrons qui sortent le plus facilement est donc donnée par l'équation

$$\frac{h}{mv} = \frac{2d}{n},$$

$$v = \frac{nh}{2md}.$$

Leur énergie cinétique $\frac{1}{2}mv^2$ est donc

$$\frac{n^2h^2}{8md^2}.$$

D'autre part, l'énergie absorbée par l'électron est égale au quantum de lumière (photon).

Soit ν la fréquence de la lumière qui provoque l'émission maximum

$$h\nu = \frac{n^2h^2}{8md^2},$$

$$\nu = \frac{n^2h}{8md^2}.$$

Ou en supposant n égal à l'unité, en désignant par λ_{max} la longueur d'onde de la lumière qui correspond à l'émission maximum

$$\lambda_{max} = 330\ d^2$$

toutes les longueurs étant exprimées en ANGSTRÖM.

En calculant d par cette formule pour divers hydrures (LI, H, NaH, KH, etc.). OPLIN trouve que la valeur de d est sensiblement proportionnelle à la somme des diamètres de l'ion métal et de l'ion hydrogène.

On conçoit qu'en remplaçant l'ion hydrogène par un ion oxygène

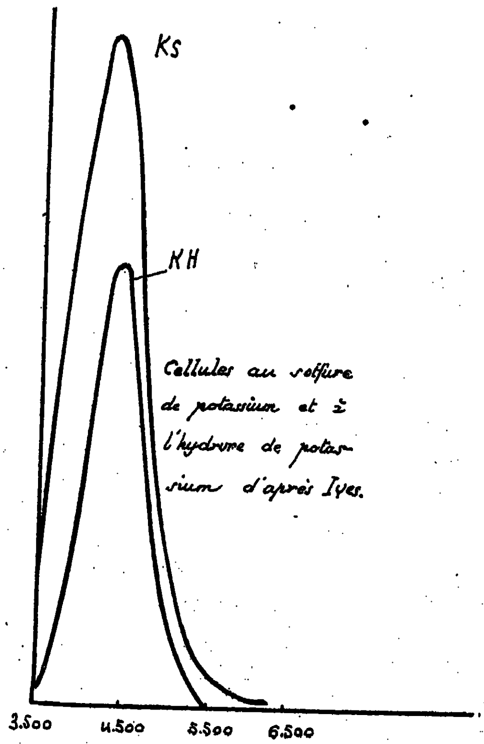


Fig. 13.

de plus grand diamètre, on augmente d et par suite la longueur d'onde du maximum de sensibilité.

De même, en utilisant un métal dont l'ion a un plus grand diamètre.

L'ion caesium a un plus grand diamètre que l'ion potassium, l'ion oxygène que l'ion hydrogène. Ceci expliquerait pourquoi les cellules à oxyde de caesium sont particulièrement sensibles dans le rouge.

Bien entendu, il est nécessaire que les couches soient aussi minces que possible pour faciliter la sortie des électrons. C'est pour cela qu'on cherche à réaliser des couches monoatomiques. Nous savons que les

constructeurs, pour chercher à réaliser une cellule donnée, apprécient par les colorations de lames minces l'épaisseur de la cellule.

A une coloration donnée correspondrait une sensibilité donnée.

Enfin, certains traitements modifient les propriétés des couches épaisses. Olpin (*Physical Review*, 2 juillet 30) a introduit dans le métal alcalin divers corps SO^2, H^2S, SO^3NCS^2, de la rosaniline, de la tropéine, de la dicyanine, etc...

Il a pu ainsi transporter le maximum de sensibilité du potassium

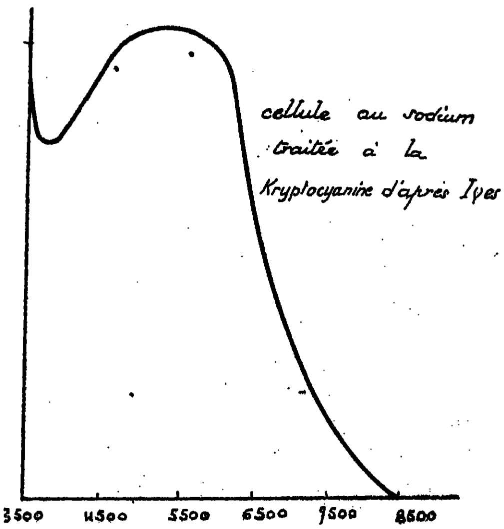


Fig. 14.

vers 600 mμ. Nous donnons, d'après Ives (*loc. cit.*), les courbes de sensibilité de deux cellules traitées (fig. 13 et 14).

La société Rhone Poulenc a pu, par un procédé probablement identique, réaliser des cellules très sensibles dans le rouge.

Le fonctionnement des cellules à vide. — Comme nous l'avons vu, une cellule soumise à l'action d'un flux lumineux donné tend à émettre un certain nombre d'électrons qui, en se dirigeant vers l'anode sous l'influence du champ accélérateur, tendent à produire un courant dans les conducteurs reliant les deux pôles de la pile aux électrodes. Le mécanisme de la circulation des électrons dans l'ampoule est à peu près identique à celui des lampes thermioniques, la seule différence étant due à ce que l'émission de la cathode est due à une action lumineuse et non à une élévation de température.

Si la différence de potentiel entre la cathode et l'anode est faible par

suite de la charge d'espace, tous les électrons susceptibles d'être émis ne le sont pas, le courant croît proportionnellement à la puissance 3/2 de la différence de potentiel, puis lorsque la différence de potentiel est suffisante, tous les électrons sont attirés vers l'anode, il y a saturation. et le courant reste constant quelle que soit la différence de potentiel appliquée aux bornes.

La différence essentielle avec les lampes thermioniques est la suivante. L'émission photoélectrique étant beaucoup plus faible que l'émission thermionique telle que nous avons l'habitude de la considérer, la charge d'espace est beaucoup plus faible et la saturation est atteinte très vite.

La figure 15 représente, à flux lumineux constant, l'émission photoélectrique en fonction du potentiel accélérateur.



Fig. 5.

Le courant photoélectrique est très faible. Nous allons voir tout à l'heure comment on peut l'amplifier en mettant du gaz dans l'ampoule. Mais on a avantage dans certains cas, quand on dispose d'un éclairement suffisamment intense, à utiliser des cellules à vide.

Ainsi en photométrie on tend à substituer les cellules à l'œil.

Il y aurait inconvénient à employer des cellules à gaz pour lesquelles, à flux lumineux égal, de faibles variations de la tension accélératrice produisent de grandes variations du courant.

En télévision également, on a intérêt à utiliser des cellules à vide qui répondent immédiatement à l'excitation lumineuse et suivent toutes ses variations, ce qui n'est pas le cas des cellules à gaz.

Cellules à gaz. — Pour amplifier le courant photoélectrique, Elster et Geitel ont imaginé d'y introduire du gaz sous faible pression (de l'ordre du dixième de millimètre).

Les électrons émis par effet photoélectrique ionisent par choc les atomes gazeux, produisent de nouveaux électrons qui viennent s'ajou-

ter aux électrons primaires et augmentent ainsi le courant. C'est le phénomène étudié pour la première fois par TOWNSEND.

On sait qu'un électron, rencontrant un atome d'un gaz donné, est susceptible d'expulser un électron lorsqu'il possède une certaine énergie W. La charge de l'électron étant e, l'énergie peut se mettre sous la forme eV, V étant par conséquent la différence de potentiel entre le point de départ de l'électron où il avait une énergie nulle et le point où il possède l'énergie W. Celle-ci peut donc être caractérisée par le potentiel V et on exprime ainsi les énergies des électrons en potentiel. L'énergie nécessaire pour ioniser un gaz donné sera caractérisée par son potentiel d'ionisation.

Considérons, entre 2 plateaux A et B entre lesquels existe une différence de potentiel créant un champ uniforme X deux plans, l'un situé à une distance x, l'autre à une distance $x + dx$ de A ; soit n le nombre d'électrons qui traversent le plan x, $n + dn$ le nombre d'électrons (augmenté par l'ionisation par choc qui traverse le plan $x + dx$, α le nombre d'électrons dus à l'ionisation par choc) qu'un électron est susceptible de produire par cm de parcours ; α est évidemment proportionnel au champ X et à la pression p, on a :

$$dn = n\alpha dx,$$

$$n = Ce^{\alpha x},$$

pour $x = 0$, $n = C$ donc $C' = n_0$ nombre d'électrons initiaux dus à l'effet photoélectrique. On voit que dans ces conditions, si on appelle l la distance entre la cathode et l'anode, à une émission photoélectrique de n_0 électrons à la cathode correspond une arrivée à l'anode de :

$$n = n_0 e^{\alpha l} \text{ électrons}$$

On peut montrer que α est de la forme :

$$\alpha = pf\left(\frac{X}{p}\right).$$

A pression constante, α augmente avec X, l'amplification due à l'ionisation par choc augmente donc avec la différence de potentiel accélératrice, car $X = \frac{V}{l}$ en supposant le champ uniforme.

Ce raisonnement explique les résultats obtenus dans la mesure du courant photoélectrique des cellules à gaz et qui sont représentés par la figure 16.

On voit qu'à partir d'une certaine tension, le courant photoélectrique croît très rapidement, la branche ascendante est presque verticale, ce qui explique pourquoi de faibles variations de tension en-

traînent des variations très importantes du courant photoélectrique. A partir d'un certain potentiel il se produit d'autres phénomènes sur lesquels nous reviendrons.

Quel gaz convient-il d'utiliser ?

En principe des gaz rares [5] : néon, argon, hélium. Ces gaz sont monoatomiques, leur anneau périphérique comporte le nombre d'électrons maximum qu'il peut comporter. C'est pour cela que ces gaz sont dénués d'affinités chimiques. Il en résulte des conséquences importantes.

Un électron qui continue à cheminer après avoir perdu dans un choc ionisant toute son énergie, peut rencontrer un autre atome avant

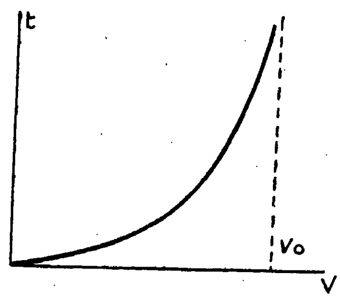


Fig. 16.

d'avoir acquis l'énergie suffisante pour ioniser. Le choc peut être mou. L'électron perd une partie de l'énergie acquise, il faudra donc qu'il rattrape cette énergie perdue avant de pouvoir ioniser de nouveau. Au contraire, avec les gaz rares, les chocs sont élastiques, l'électron ne perd pas son énergie. Un électron, sans ioniser un atome, peut s'accrocher à lui pour constituer un ion négatif. Ceci est impossible avec les gaz rares dont l'anneau périphérique est saturé. Enfin les gaz comme l'hydrogène sont absorbés à la longue par les parois du verre, la cellule devient presque vide, au contraire les gaz rares sans affinité chimique ne sont pas absorbés.

Ce sont donc les gaz rares, néon, argon, hélium, qu'il convient d'utiliser après les avoir purifiés. Nous rappelons par exemple que l'argon du commerce est souillé d'azote.

L'expression de α montre que la pression intervient au numérateur et au dénominateur.

(5) D'après Tedham (*Philosophical Magazine*, août 1931), si la pression est faible, il faut employer un potentiel accélérateur élevé et un gaz de poids atomique élevé.

Il doit donc y avoir en fonction de la pression une valeur maximum de α, c'est-à-dire de l'amplification du courant photoélectrique par suite de l'ionisation par choc.

Si l'action photoélectrique est instantanée ou du moins se produit dans un temps inférieur au 10 millionième de seconde, il n'en est pas de même des phénomènes d'ionisation par choc. La mobilité des ions dans les gaz (c'est ainsi qu'on désigne leur vitesse) est relativement faible. Il en résulte que les cellules à gaz ne suivent pas des variations très rapides de la lumière, et cela d'autant moins qu'on cherche à obtenir une amplification plus grande en élevant le potentiel accélérateur. La sensibilité de la cellule n'est pas la même pour une lumière continue ou une lumière interrompue. Cela tient à ce

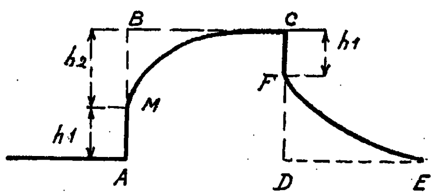


Fig 17.

que le courant dans la cellule ne cesse pas immédiatement lorsqu'on interrompt la lumière.

Nous donnons, d'après Campbell, un relevé fait à l'oscillographe cathodique qui montre comment se produit ce phénomène de traînage (fig. 17).

La ligne rectangulaire pointillée montre comment se produit l'action de la lumière.

Si le phénomène était instantané, la forme de la courbe de courant serait la même.

On constate, au contraire, que le courant atteint instantanément une valeur AM $= h_1$ puis croît lentement jusqu'à la valeur $h_1 + h_2$ correspondant au flux lumineux qu'il reçoit. Lorsque l'éclairement cesse en C le courant décroît brusquement de h_1, puis lentement pour revenir en E à O.

Il est à remarquer que l'aire de la courbe AMCFE est égale à l'aire du rectangle ABCD. La quantité d'électricité dégagée par la cellule est donc la même que si le phénomène avait été instantané.

Si on produit des interruptions rapides, on peut concevoir que le courant n'a pas le temps de revenir au zéro.

C'est ce qui explique l'expérience suivante que nous avons eu l'occasion de faire.

Une cellule à gaz, travaillant près du potentiel limite, était éclairée par de la lumière interrompue par un disque percé de trous.

La figure 18 représente les déviations observées sur l'écran de l'oscillographe.

AB représente la déviation pour un éclairement constant, BC pour des interruptions de 50 p:s, CD pour des interruptions de 500 p:s. On voit pourquoi il n'est pas possible d'obtenir de bonnes amplifications de courant des cellules à gaz en les éclairant par de la lumière interrompue et en utilisant un amplificateur à transformateur.

D'après Campbell, lorsqu'on augmente le potentiel accélérateur, la partie h_1 croît, ce qui montre qu'une partie de l'ionisation du gaz

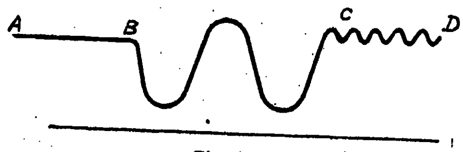


Fig. 18.

n'est pas sujette au traînage. Mais le traînage est beaucoup plus grand dans la 2ᵉ partie de la courbe.

La cause de ces phénomènes de traînage n'est pas encore connue.

En tous cas, en télévision, il convient de ne pas utiliser des cellules à gaz.

Potentiel limite.

Nous avons vu que, lorsqu'à éclairement constant on augmente progressivement le potentiel accélérateur, le courant croît rapidement. Pour une certaine limite qui dépend de l'éclairement, une lueur apparaît dans la cellule et se maintient, même lorsqu'on diminue un peu le potentiel accélérateur. Les phénomènes d'allumage et d'extinction ne sont pas réversibles. Cette lueur est de même nature que les effluves. Cette lueur par elle-même ne serait pas dangereuse pour la cellule. D'après certains auteurs elle augmenterait même, pendant un certain temps, la sensibilité. Mais cette lueur qui est, au début, de même nature que les effluves (phénomène de couronne) peut être suivie immédiatement d'un arc qui dégage une grande quantité de chaleur, et amène la destruction de la matière active et aussi presque toujours la fêlure du tube.

Remarque importante. *Pour éviter l'amorçage d'un arc, il est de toute nécessité, quand on utilise une cellule à gaz, de mettre en série avec la batterie donnant le potentiel accélérateur une résistance élevée de l'ordre du mégohm, afin d'éviter que la lueur, si elle se produit, se transforme en arc.*

Quelle est l'origine de cette lueur ? Nous avons dit tout à l'heure que, si le champ à l'intérieur de la cellule est assez élevé, les ions positifs à leur tour peuvent produire une ionisation par choc.

Introduisons pour ces ions un coefficient β de même nature que le coefficient α que nous avons envisagé pour les électrons, on arrive pour le nombre n d'électrons arrivant à l'anode à la distance l de la cathode d'où partent n_0 électrons à la valeur.

$$n = \frac{n_0(\alpha - \beta)\,e^{(\alpha-\beta)l}}{\alpha - \beta e^{(\alpha-\beta)l}}.$$

Si $\alpha = \beta e^{(\alpha-\beta)l}$ n devient infini, c'est à ce moment que se produit la décharge lumineuse et le potentiel pour lequel se produit pour une cellule donnée ce phénomène, est le potentiel explosif.

En réalité, les phénomènes sont un peu plus compliqués que ne l'indique la théorie. D'après la formule, le courant devrait être proportionnel à n_0, c'est-à-dire au flux lumineux reçu par la cellule, et le potentiel explosif indépendant de cet éclairement, la fig. 19 montre qu'il n'en est rien.

Dans cette figure, on a porté en abscisses les tensions, en ordonnées les logarithmes du courant : les courbes se rapportent à des éclairements dont les logarithmes augmentent d'une quantité constante.

Si, par conséquent, le courant est proportionnel au flux lumineux, les courbes devraient être parallèles. On constate qu'elles ne le sont plus lorsque le potentiel accélérateur devient assez élevé. On constate en outre que le potentiel explosif, point limite de la courbe, est d'autant plus bas que l'éclairement est plus intense.

La courbe des potentiels explosifs, tracée en pointillé, a été extrapolée jusqu'à l'axe des x qu'elle coupe pour 215 V.

C'est pour cette tension que la décharge s'amorcerait dans la cellule non éclairée. Mais si l'éclairement est tel que le courant atteigne des valeurs du même ordre de grandeur que celles dues à la décharge lumineuse sans éclairement, il n'y a plus passage brusque du courant photoélectrique à la décharge lumineuse, mais transition graduelle et à ce moment le phénomène photoélectrique est très nettement irréversible, on peut supprimer la lumière et le courant continue à cir-

culer. C'est ce qui se passe pour la courbe 177,8. Il y a un certain éclairement critique de la cellule.

Il résulte de ceci que si l'on veut, dans une cellule à gaz, admettre la proportionnalité du courant au flux lumineux, il est de toute nécessité de se maintenir au-dessous du potentiel explosif.

Du reste, il existe dans toutes les cellules un courant d'obscurité qui est d'autant plus élevé que le potentiel accélérateur est lui-même plus élevé.

Ce courant est probablement dû aux quelques électrons qui se

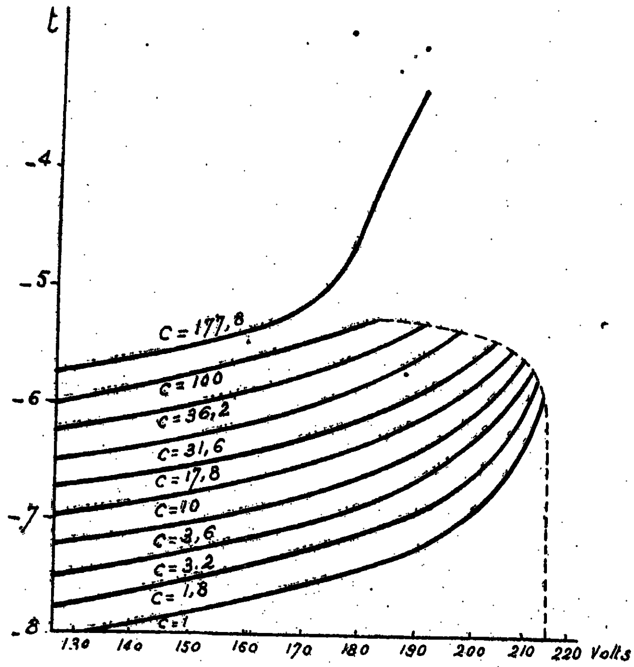


Fig. 19.

trouvent toujours dans un gaz et produisent un peu d'ionisation par choc.

Ce courant croît beaucoup plus vite avec la tension que le courant photoélectrique.

Avec les éclairements intenses, ce courant est négligeable devant le courant photoélectrique.

Avec les éclairements faibles il est nécessaire, pour que le courant d'obscurité ne soit pas plus grand que le courant photoélectrique, de ne pas avoir de potentiel accélérateur trop élevé, ce qui ne permet pas d'utiliser toute l'amplification que serait susceptible de donner la présence du gaz.

On pourra remarquer la différence entre les caractéristiques à flux lumineux constant d'une cellule telles qu'elles sont représentées dans les fig. 15 et 19.

Cela tient à la différence de forme de cellules. La fig. 15 se rapporte à une cellule sphérique, la fig. 19 à une cellule plate.

On voit l'influence de la forme des cellules, influence qui est commandée par la forme du champ électrique. Ce champ, uniforme entre deux plaques parallèles, cesse de l'être lorsqu'on s'éloigne de la forme du condensateur à plaques parallèles.

La formule simple établie pour l'ionisation par choc n'est plus vérifiée.

Nous n'entrerons pas dans le détail des modifications que la forme du champ peut apporter.

Quoi qu'il en soit, on voit que si on tient à avoir des variations de l'intensité du courant bien proportionnelle au flux lumineux dans une cellule à gaz, il faut se placer dans la région de la fig. 19 où les caractéristiques sont rectilignes.

Dans ces conditions le courant à flux constant est proportionnel à E.

D'autre part, à potentiel accélérateur constant, il est proportionnel au flux lumineux, on peut donc écrire

$$i = GE\varphi.$$

Mais dans la pratique, comme nous l'avons vu, il y a toujours une résistance élevée en série avec la cellule, d'une part pour éviter un amorçage d'arc si la tension était portée à une valeur trop haute, et d'autre part pour produire, sous l'influence du passage du courant photoélectrique, une chute de tension qu'on amplifiera pour utiliser le courant.

Soit R cette résistance, soit U la différence de potentiel aux bornes de la batterie, on aura

$$i = G\varphi(U - Ri),$$

ou

$$i = \frac{G\varphi U}{1 + GR\varphi}.$$

On voit que pour que le courant soit rigoureusement proportionnel au flux lumineux, il faut que $GR\varphi$ soit négligeable devant l'unité, c'est-à-dire que si on recherche la proportionnalité rigoureuse du courant au flux lumineux, il faut que R ne soit pas trop élevé.

Fonctionnement intermittent.

Supposons une cellule montée en série avec un diode dont le chauffage est tel que le courant de saturation soit obtenu sous une faible tension fig. 20. Soit i le courant de saturation.

Si la cellule est éclairée par un certain flux φ, le courant qu'elle pourra débiter ne pourra être supérieur à celui que peut débiter le diode. Donc, automatiquement, le point de fonctionnement de la cellule se place sur la caractéristique correspondant au flux φ point pour lequel le courant est i :

Soit E_1 le potentiel accélérateur correspondant, la tension aux

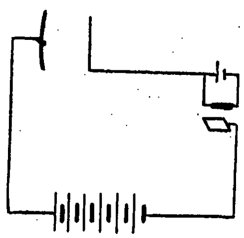


Fig. 20.

bornes de la cellule doit être E et par suite la différence de tension $E - E_1$ est absorbée par le diode. Bien entendu il faut que $E - E_1$ soit suffisant pour saturer le diode.

Supposons maintenant que i soit supérieur au courant limite i_1 qui correspond à la décharge lumineuse, il ne peut évidemment s'établir d'équilibre stable. Supposons qu'à la cellule éclairée nous appliquions brusquement le potentiel accélérateur, la cellule peut être toujours considérée comme ayant une capacité en parallèle, celle des électrodes. (On pourra du reste modifier le phénomène dont nous parlons en mettant une capacité réelle en parallèle).

Cette capacité se charge en prenant un temps de charge d'autant plus long que le courant i est plus faible. A un instant donné, elle reçoit par le diode un courant i, elle perd par le phénomène photoélectrique, qu'on peut assimiler à la fuite d'un condensateur, un courant $i' < i$. Le potentiel aux bornes du condensateur constitué par les deux électrodes monte. Puisque i est plus grand que le courant limite i_1, ce potentiel atteint la valeur critique E_1, une décharge s'amorce. Le courant I qui passe dans cette décharge est beaucoup plus grand que i, la différence de potentiel aux bornes de la cellule

s'abaisse et la décharge lumineuse s'arrête lorsque la différence de potentiel atteint une valeur $E_2 < E_1$ et pour laquelle le courant de décharge lumineuse était $I_2 > i$.

A ce moment, la tension aux bornes de la cellule est E_2, elle débite un courant $i'' < i$, le potentiel aux bornes de la cellule monte, puisque la capacité qu'elle constitue reçoit une quantité d'électricité plus grande que celle qu'elle perd, le potentiel atteint la valeur E_1 et le processus recommence. On a ainsi une série de décharge intermittentes. Quelle est la durée de la décharge ? Elle se compose de deux parties, un temps τ_1 pendant lequel le condensateur se charge, et le temps τ_2 de la décharge. Celui-ci étant très court, on peut le négliger et prendre τ_1 pour durée de la décharge. A un instant donné, la tension a une valeur U comprise entre C_1 et C_2, soit le courant photoélectrique correspondant.

Dans l'unité de temps, la cellule reçoit *idt* elle perd *jdt*. Donc en appelant C la capacité de la cellule :

$$C du = (i - j) dt$$

et si nous posons $j = (fu)$

$$\tau_1 = C \int_{E_2}^{E_1} \frac{dU}{i - f(u)}.$$

Cette équation nous montre que τ_1, la durée de l'oscillation de relaxation envisagée, augmente avec C et diminue avec i. Au point de vue de l'influence de la lumière, il est difficile de discuter cette formule à cause de la complexité de la fonction f et du fait que E_1 varie avec l'éclairement. L'expérience montre que les résultats sont très complexes.

Avec des cellules sphériques, NORMAN CAMPBELL a constaté que τ_1 augmentait avec l'éclairement et que la durée des intermittences tendait à devenir infinie lorsqu'on s'approchait, en augmentant l'éclairement, de la courbe limite où il n'y a pas transition entre le courant photoélectrique et le courant lumineux.

Pour des cellules plates, pour de faibles éclairements, la durée croît avec l'éclairement. On atteint un éclairement pour lequel il n'y a plus de décharges intermittentes, puis elles réapparaissent et leur durée décroît quand l'éclairement augmente.

On a proposé d'utiliser ce procédé pour des mesures photométriques. Pour faciliter l'opération, on place une capacité en dérivation aux bornes de la cellule éclairée par une des sources lumineuses à comparer, et on règle la capacité et le courant i de façon à ce que les intermittences entendues dans un téléphone placé dans le secon-

daire d'un transformateur dont le primaire est dans le diode aient une certaine cadence. On substitue la 2[e] source et on règle sa distance à la cellule de façon à reproduire la même cadence des intermittences.

Dans ces conditions, en appelant d_1 et d_2 les distances des deux sources à la cellule, on a

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{d^2_1}{d^2_2}.$$

On aurait pu, par ce procédé, mettre en évidence des flux de 10^{-9} lumens.

Nous avons examiné le cas qui, théoriquement, était le plus simple

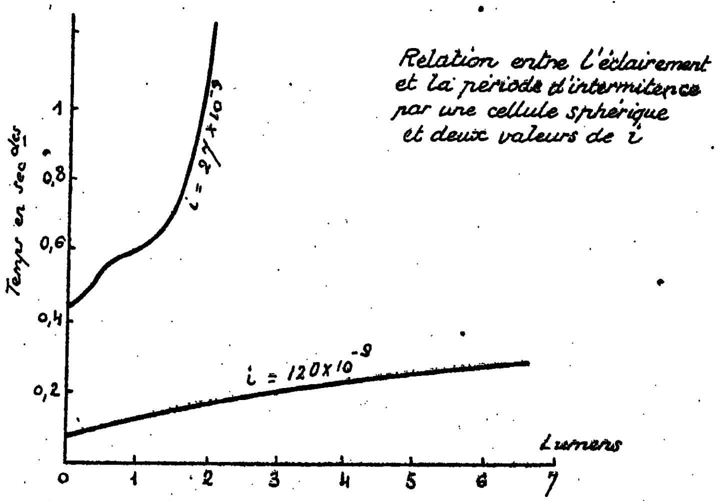


Fig. 21.

en supposant en série avec la cellule un diode qui débite un courant constant.

Des décharges intermittentes d'un mécanisme assez semblable à celui que nous avons exposé peuvent se produire lorsque la tension de la batterie fournissant le potentiel accélérateur est supérieur au potentiel explosif pour l'éclairement donné et qu'une résistance très élevée est en série.

Au fond, le mécanisme de ces décharges intermittentes, dans les deux cas que nous avons envisagés, est identique à celui des oscillations de relaxation qu'on produit avec des tubes à néon.

Nous signalerons à ce sujet une expérience personnelle ; le courant d'une cellule photoélectrique dans l'obscurité ne se montrait pas stable. Il le devenait lorsqu'on exposait la cellule à un éclairement très faible (ciel nocturne).

On peut expliquer par ces décharges intermittentes un phénomène constaté par DUNOYER dans certaines cellules.

Celles-ci étaient plates et l'anode constituée par un fil. Une résistance élevée était dans le circuit. Lorsque la cellule étant éclairée, on faisait croître le potentiel accélérateur, pour une certaine valeur le courant avait un accroissement brusque. A ce moment commençaient probablement des décharges intermittentes très rapides, assez rapides du moins pour que les appareils à courant continu utilisés eussent des déviations stables.

Pendant une partie du temps, le courant débité était dû au régime d'effluves, beaucoup plus important que le courant normal, ce qui expliquait l'augmentation de courant moyen.

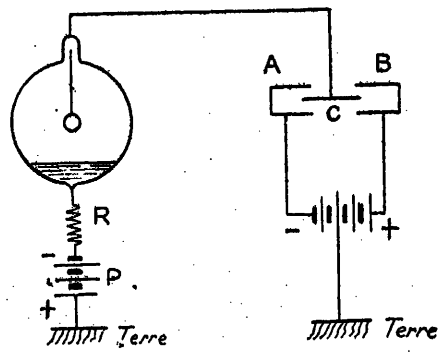


Fig. 22.

Mesure et utilisation des courants photoélectriques. — Les courants photoélectriques sont très faibles. Une cellule à gaz avec une structure de 1 cm^2 exposée à la lumière du jour dans une pièce (éclairement de l'ordre de 1 000 lux) donne dans ces conditions de bonne sensibilité un courant de 100 microampères environ.

Un appareil à lecture directe permet de mesurer ce courant.

Avec une lampe de 20 bougies à 1 m, éclairement 20 lux, le courant tombe à une fraction de microampères. Il est nécessaire d'utiliser un galvanomètre sensible pour l'évaluer.

En plaçant la cellule au foyer d'une lunette de 20 cm de diamètre braquée sur une étoile de 3^e magnitude, le courant est de l'ordre de 10^{-11} ampères. Pour le mesurer, il faut employer un électromètre.

Le montage est le suivant (fig. 22).

Les 2 plateaux A et B de l'électromètre sont réunis aux 2 pôles d'une batterie dont le milieu est réuni à la terre, l'aiguille C est réunie à

l'anode de la cellule. La batterie P fournit le potentiel accélérateur, R est une résistance de protection de quelques mégohms.

Soit i le courant photoélectrique à un instant donné, en appelant C la capacité de l'aiguille on a

$$i = C\frac{dV}{dt}.$$

Comme, d'autre part, la déviation θ de l'électromètre est proportionnelle à V, on a

$$\frac{d\theta}{dt} = Ki.$$

Autrement dit, la vitesse du déplacement de l'aiguille de l'électromètre est proportionnelle au courant photoélectrique.

On opère de la manière suivante. On éclaire la cellule. Le spot dévie, on note à un instant donné sa position θ_0 puis n secondes après sa position θ_1, la vitesse de déplacement est $\frac{\theta_1 - \theta_0}{n}$. La constante K peut être déterminée de plusieurs manières. On peut appliquer sur l'aiguille une tension U par l'intermédiaire d'une résistance très élevée X connue. Le courant est U/X. On peut utiliser dans une chambre d'ionisation le courant d'ionisation produit par un sel radioactif connu. On peut aussi utiliser un quartz piézoélectrique dont une des armatures est réunie à l'aiguille, l'autre au sol et sur lequel on exerce une traction continue connue.

Du reste, nous nous bornons à signaler l'emploi de l'électromètre et le principe de son emploi qui est fort délicat.

Pour diminuer la capacité C, il faut, d'une part avoir une aiguille de dimensions réduites et, d'autre part diminuer la longueur des fils de connexion.

Pour arriver à ce résultat, Rougier pour ses études de photométrie stellaire, a utilisé un électromètre dont l'aiguille est constituée par un fil et qui est fixé à côté de la cellule sur la lunette. L'appareil est suspendu à la cardan et on vise au microscope l'aiguille. C'est le déplacement par rapport au micromètre oculaire qui donne la valeur du courant.

Pour beaucoup d'applications on a besoin d'amplifier le courant photoélectrique, par exemple en télévision.

On utilise des triodes. Le montage de la première lampe est le suivant (fig. 23).

Le courant photoélectrique i parcourant la résistance élevée R produit entre la grille et le filament une différence de potentiel Ri. Avec le

montage indiqué, la tension grille s'abaisse, le courant plaque diminue.

Il importe de remarquer que l'action n'est pas instantanée. Soit i le courant photoélectrique, la différence de potentiel filament grille à un instant donné est e. Le courant photoélectrique se divise en 2 courants. l'un égal à e/R traverse la résistance, l'autre charge la capacité C filament grille, on a donc

$$i = \frac{e}{R} = C\frac{de}{dt}$$

d'où

$$e = Ri\left(1 - e^{-\frac{t}{CR}}\right).$$

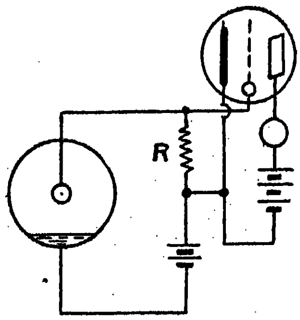


Fig. 23.

On voit donc que le régime stable n'est atteint qu'au bout d'un temps infini.

Si par exemple on veut se contenter de la valeur $\left(1-\frac{1}{e}\right)$ de la valeur limite, cela n'a lieu qu'au bout d'un temps t tel que

$$\frac{t}{CR} = 1.$$

Dans la pratique C est de l'ordre de 10^{-11} farad.

Pour R = un méghom, ce n'est qu'au bout de $1/10^5$ seconde, que la différence de potentiel filament grille aura atteint la valeur

$$Ri\left(1 - \frac{1}{e}\right).$$

Ce temps est évidemment court, mais dans les questions de télévision, des retards de cette espèce peuvent être gênants.

Bien entendu, une seule lampe ne suffit pas. On place une résistance R dans la plaque de cette lampe et cette résistance sert à trans-

mettre les variations du courant plaque de la première lampe à un certain nombre d'étages en courant continu.

Bien entendu, pour diminuer la capacité C il convient :

1° d'utiliser des lampes à corne pour la sortie grille ;

2° de placer la première lampe aussi près que possible de la cellule.

Bien entendu, lorsqu'on tient à la proportionnalité entre le flux lumineux et le courant photoélectrique, il faut tenir compte des règles énoncées plus haut.

Au contraire, lorsqu'on veut avoir beaucoup de sensibilité, il faut faire la résistance R grande. Pour cela, on supprime purement et simplement cette résistance qui est remplacée en réalité par la résistance

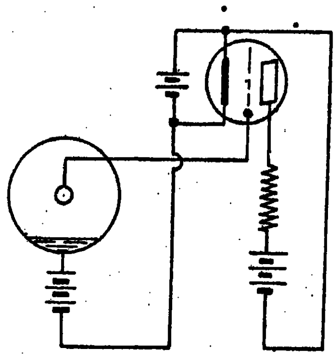


Fig. 24.

d'isolement filament grille, et pour rendre cette résistance aussi élevée que possible, on utilise une lampe à corne pour la sortie grille (fig. 24).

Dans ces conditions on voit que les électrons qui arrivent à l'anode vont charger la grille qui devient de plus en plus négative.

Mais si la lampe n'est plus parfaitement vidée, les ions positifs résultant de l'ionisation par choc viennent décharger la grille. Pour éviter cet inconvénient on utilise une lampe bigrille (Ferrié et Jouaust).

Dans ces conditions on peut utiliser sur la plaque des tensions inférieures à une vingtaine de volts, par conséquent inférieures aux potentiels d'ionisation.

Un dispositif de ce genre a été utilisé par Tardy dans son spectrophotomètre d'absorption. Dans cet appareil destiné à mesurer le coefficient d'absorption d'un verre en fonction de la longueur d'onde, on fait au moyen d'un dispositif optique que nous ne décrirons pas, tomber alternativement sur la cellule une mince région du spectre, soit directement, soit par transmission à travers le verre. Derrière la première

lampe est placée une lampe amplificatrice à courant continu. Dans la plaque de cette lampe est placé un transformateur dont le secondaire est fermé en court-circuit sur un ampèremètre qui doit rester au repos lorsqu'on manœuvre le dispositif optique. Si nous décrivons ce procédé, c'est pour expliquer comment doit être choisi le galvanomètre dans un dispositif de ce genre. L'appareil doit être évidemment sensible. Mais étant donné ce que nous avons dit plus haut, la variation du courant dans la plaque de la lampe est lente, pratiquement de l'ordre de plusieurs secondes. Le galvanomètre ne fonctionne donc pas comme un balistique. Son fonctionnement est le même que celui utilisé pour la mesure des intensités des courants alternatifs, courants qui traversent le primaire d'un transformateur dont le secondaire est fermé sur un ampèremètre peu résistant. Le galvanomètre choisi doit donc être sensible, peu résistant et de courte période. C'est un résultat sur lequel il convient d'attirer l'attention parce qu'il n'était pas évident *à priori*.

Signalons incidemment qu'on réalise depuis peu des lampes spécialement étudiées qu'on dénomme lampes électromètres avec lesquelles il serait possible de mesurer des courants de l'ordre de 10^{-13}, le courant filament grille étant inférieur à 10^{-13} A.

Nous avons eu l'occasion d'utiliser de semblables lampes. Il semble en effet que leur emploi doive permettre de mesurer avec les cellules des éclairements excessivement faibles.

Nous signalerons encore quelques applications scientifiques des cellules photoélectriques.

On a pu au moyen des cellules photoélectriques enregistrer les oscillations d'un pendule sans liaison mécanique.

On sait que dans les observatoires les pendules astronomiques sont placées dans des caves à température constante.

Les indications de ces pendules sont transmises dans les diverses salles de l'observatoire par le dispositif suivant.

Chaque fois que le pendule passe par la verticale, il ferme au moyen d'un cliquet et d'une roue à rochet un contact électrique. C'est le courant produit par la fermeture de ce contact qu'on enregistre sur un chronographe et qui indique les différentes secondes. Mais le mécanisme qui provoque la fermeture du contact comporte des organes très délicats, les fermetures pour les différentes secondes ne se produisent pas toujours au moment du passage par la position d'équilibre. Il en résulte que les différentes secondes ne sont pas identiques entre elles.

On constate jusqu'à des différences de 5 millièmes entre deux secondes consécutives, ces différences se reproduisent avec la périodicité

des rouages. Bien entendu, il s'agit d'irrégularités qui se compensent dans la marche journalière de la pendule, mais qui n'en sont pas moins gênantes pour les observations astronomiques.

Pour remédier à cet état de choses le général FERRIÉ a imaginé de placer sur le pendule un miroir qui est éclairé par une source lumineuse placée derrière une fente.

L'image réelle de cette fente dans le miroir sphérique se déplace avec celui-ci comme le spot d'un galvanomètre. Mais chaque fois que le pendule passe par sa position d'équilibre, elle tombe sur une autre fente derrière laquelle est la cellule. Le courant photoélectrique convenablement amplifié peut agir sur l'enregistreur du chronographe.

Dans le dispositif réalisé à l'Observatoire de Paris, le pinceau lumineux renvoyé par le miroir était reçu par un miroir incliné à 45° qui transformait ce pinceau horizontal en un faisceau vertical remontant le long d'un puits de 27 m de profondeur. La cellule et son dispositif amplificateur étaient placés au sommet de ce puits et n'étaient donc pas soumis à l'humidité de la cave.

Un dispositif de ce genre vient d'être employé au Bureau of Standards.

L'irrégularité des rouages des pendules se faisait également sentir dans l'émission par une pendulette des signaux horaires. Pour y remédier on utilise maintenant pour cette émission à l'Observatoire de Paris un pendule libre qui chaque fois qu'il passe par la verticale agit par un procédé identique à celui que nous venons de décrire sur une cellule photoélectrique. Comme ce pendule est court et donne 2 oscillations simples par seconde, il donnerait 2 émissions de courant photoélectrique par seconde.

Le courant photoélectrique, en même temps qu'il commande le relais de manipulation de la Tour Eiffel ou du Bureau Central Radio, synchronise une pendulette qui commande un obturateur qui interrompt la lumière pendant la moitié du temps.

Des relevés effectués en Angleterre sur les émissions des battements horaires de la Tour Eiffel ont montré qu'ils étaient égaux à moins de 1 millième de seconde près.

Quelques procédés particuliers d'amplification du courant des cellules photoélectriques. — L'amplification d'un courant continu est un problème délicat. Au contraire l'amplification d'un courant alternatif est beaucoup plus facile à réaliser. On a donc eu l'idée de moduler le courant continu produit par la cellule photoélectrique pour le transformer en courant alternatif.

Deux solutions se présentent, soit moduler la lumière, soit moduler le courant.

On peut par exemple placer devant la source lumineuse un disque tournant muni de fentes. Si le secteur a *p* fentes et s'il fait *n* tours par seconde, la fréquence de modulation est *np*.

Avec les cellules à gaz ce procédé ne peut pas fournir de bons résultats puisque, comme nous l'avons montré, le courant photoélectrique met un certain temps à s'établir et à disparaître.

Au fond, il passe dans la cellule un courant constant légèrement modulé et c'est la petite composante alternative qui est seule modulée.

Avec les cellules à vide, très sensibles qu'on réalise maintenant, le procédé peut être plus intéressant.

Un autre procédé indiqué il y a longtemps par Elster et Geitel consiste à faire agir sur les cellules un électro-aimant parcouru par du courant alternatif de fréquence musicale.

On sait que les électrons sont déviés par les champs magnétiques. On fait varier notablement le courant d'une cellule en approchant un aimant permanent. On peut donc ainsi moduler le courant.

Pour commander un relais par le courant d'une cellule photoélectrique, on peut utiliser des tubes à néon à grilles.

Par exemple on construit des tubes à néon dans lesquels la cathode est constituée par un cylindre, l'anode par un fil central enroulé en spirale.

Une autre spirale entourant l'anode constitue la grille.

Si on applique une tension élevée entre anode et cathode, la grille qui a recueilli des électrons est chargée négativement et empêche le passage du courant.

Si la grille est légèrement positive la décharge s'amorce et le courant continue à passer même si on enlève la tension négative appliquée à la grille, du moins si le tube est alimenté en courant continu. S'il est alimenté en courant alternatif, la décharge s'interrompt au zéro de la tension d'alimentation.

On peut faire agir sur la grille, par l'intermédiaire d'un condensateur, la tension aux bornes d'une résistance élevée intercalée dans le circuit de la cellule.

Nous donnons ci-après le schéma d'un montage que nous avons eu l'occasion d'employer (fig. 25).

Le courant de la cellule photoélectrique est amplifié par une première lampe bigrille (procédé déjà décrit) et celle-ci est couplée à une

deuxième lampe amplificatrice par le dispositif habituel des amplifications à courant continu.

On voit que lorsque l'interrupteur I est fermé, une tension E susceptible de provoquer l'allumage existe entre la cathode et l'anode du tube à néon.

Mais la grille de ce dernier est par rapport à la cathode à une tension E — Ri, i courant plaque de la deuxième lampe et de ce fait l'allumage ne peut avoir lieu.

Si le courant plaque de la deuxième lampe vient à diminuer, la différence de potentiel aux bornes du condensateur C, qui est en même temps la tension grille cathode, prend une tension telle que l'allumage peut se produire entre grille et cathode. Cette décharge est produite par la décharge du condensateur C puis la décharge amorcée passe entre anode et cathode, le condensateur C qui ne peut se charger qu'à travers R_2, c'est-à-dire lentement, ne peut entretenir la décharge entre grille et cathode. R_2 est une résistance de protection. L'interrupteur I fait partie d'un relais qui coupe le tube lorsqu'il est allumé.

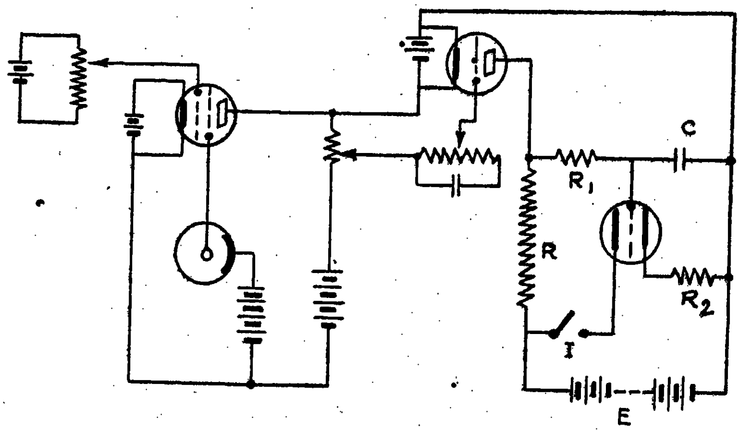


Fig. 25.

R était de l'ordre de 10 000 ohms ; R_1 de plusieurs mégohms, C de quelques dixièmes de microfarad, E de 240 V.

Emploi des cellules en radiothérapie. — Des cellules en quartz et au cadmium sont sensibles à l'ultra-violet.

Avec des filtres convenables on arrive à donner à ces cellules la même sensibilité que celle de la peau aux radiations ultra-violettes.

On peut ainsi étudier les sources au point de vue de l'action thérapeutique de l'ultra-violet qu'elles produisent.

Nous donnons 2 courbes ; la courbe supérieure (fig. 26) représente, à énergie égale en fonction de la longueur d'onde, l'érythème produit sur la peau par des radiations ultra-violettes ; la courbe inférieure, les courants photo-électriques d'une cellule au cadmium dans le quartz devant laquelle est placé un écran de verre Uviol de 1,5 millimètre (6).

Il ne semble pas que la sensibilité soit la même dans les 2 cas. Néanmoins les médecins peuvent tirer de l'examen à la cellule certains renseignements sur l'état de leur appareil producteur de rayons ultra-violets.

Il se peut que les cellules à l'uranium proposées récemment par RENTSCHLER, donnent de meilleurs résultats.

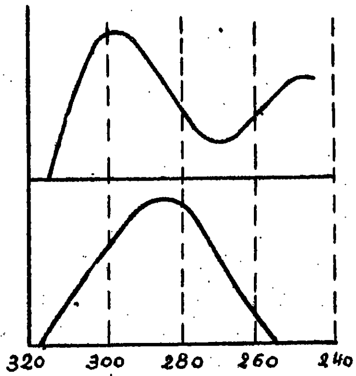


Fig. 26.

Emploi des cellules pour les films sonores. — Nous ne parlerons pas de l'emploi des cellules à la télévision, nous dirons quelques mots d'une application industrielle très importante, celle des films sonores.

Le principe consiste à enregistrer simultanément sur la même pellicule la prise de vue et la parole.

On module une course lumineuse par la voix, soit en la faisant agir sur un miroir vibrant, soit au moyen d'une cellule de KERR.

La cellule de KERR se compose d'une cuve à faces parallèles contenant un liquide convenable (CS^2 etc...) placée entre deux nicols. Les nicols sont à l'extinction, par conséquent la lumière d'une lampe placée en avant du polariseur ne traverse pas le système. Si on exerce une pression sur la cuve à faces parallèles, cette pression se transmet au liquide qui subit une transformation telle que le plan de polarisa-

(6) La cellule au cadmium n'est plus sensible à partir de 3 800 Angströms. L'écran en verre Uviol semble avoir été mis pour rapprocher la sensibilité de la cellule de celle de la peau. (Voir GRIFFITH, Photo-électric cells und their applications, édité par *The Physical and Optical Societies*, London, p. 194).

tion tourne. La lumière réapparaît. On conçoit qu'en faisant agir la pression de l'air sous l'influence de la voix on puisse moduler une lumière et que cette modulation s'enregistre sur la pellicule.

Pour reproduire la parole, il suffit alors de faire défiler la pellicule entre une source lumineuse et une cellule photoélectrique dont bien entendu on amplifie le courant pour l'envoyer dans un haut parleur.

Emploi des cellules en photométrie. — Il semble que les cellules soient appelées à jouer un rôle important en photométrie.

Nous croyons donc devoir développer ce sujet.

Tout d'abord les cellules n'ont pas la même courbe de sensibilité que l'œil. Elles ne peuvent donc remplacer l'œil et en première ana-

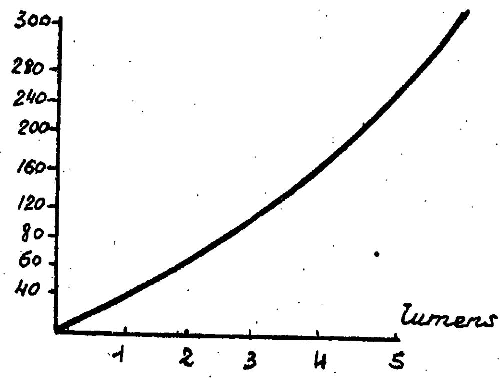


Fig. 27.

lyse nous ne devons envisager que le cas où on a à comparer des lampes de même couleur, comme cas particulier celui où on veut déterminer l'intensité lumineuse d'une lampe ou d'un appareil d'éclairage dans diverses directions.

Quelles cellules doit-on utiliser en photométrie ?

L'emploi des cellules à gaz est à rejeter immédiatement.

1° Le courant photoélectrique n'est pas proportionnel au flux lumineux comme le montre la figure ci-dessous se *rapportant à une tension constante* à la cellule.

Dans cette figure (fig. 27) la sensibilité est plus grande lorsque l'éclairement augmente.

Pour certaines cellules ce serait le contraire (catalogue Philipps).

D'autre part, il est très difficile de maintenir constante la tension aux bornes d'une cellule surtout si on utilise des piles. Or on a vu que, dans la région où l'ionisation amplifie le courant photoélectrique, une

faible variation de tension fait varier d'une façon importante le courant photoélectrique.

Enfin comme il est nécessaire, pour empêcher l'amorçage d'arc dans les cellules photoélectriques à gaz, de placer en série une résistance électrique élevée (de l'ordre du mégohm), si on veut comparer entre elles des lampes d'intensité lumineuse différente, le courant photoélectrique n'étant pas le même, les courants photoélectriques, même en admettant qu'à tension constante ils soient proportionnels au flux lumineux, ne conserveraient pas cette proportionnalité.

Tant qu'on a eu uniquement des cellules au potassium, sensibles

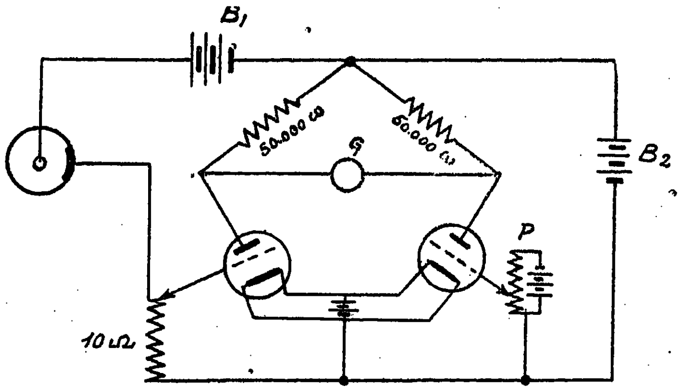


Fig. 28.

uniquement dans le bleu, c'est-à-dire pour des radiations qui n'existent que très peu dans nos sources de lumière, il était toutefois nécessaire, pour avoir des courants suffisamment intenses, d'utiliser des cellules dans le gaz.

Pour éliminer toutes les causes d'erreur que nous venons de mentionner, il était nécessaire d'opérer par substitution, c'est-à-dire qu'il fallait substituer instantanément à la lampe dont on voulait mesurer l'intensité, une lampe étalon placée à une distance telle que le courant photoélectrique eut la même valeur dans les deux cas.

Dans ces conditions, en appelant X l'intensité lumineuse cherchée. I celle de la lampe, d et d_1 leur distance au photomètre on aurait :

$$\frac{X}{d^2} = \frac{I}{d_1^2}.$$

En outre, les courants photoélectriques étant très faibles, il était nécessaire de les amplifier au moyen de lampes triodes.

Voici par exemple un montage d'amplification utilisé par Clayton Sharp (fig. 28).

Le potentiel accélérateur est fourni par l'ensemble des deux batteries B_1 et B_2 dont l'une alimente également un pont de Wheastone dont les bras sont constitués par deux résistances de 50 000 ohms et deux résistances filament grille de deux triodes. La différence de potentiel filament grille est réglée dans l'un par le potentiomètre P et dans l'autre par le courant provenant de la cellule et qui traverse une résistance de 10 mégohms. L'équilibre est d'abord réalisé dans l'obscurité. Si on éclaire la cellule par la lampe à étudier, l'équilibre est rompu. Il faut agir sur le potentiomètre P pour le rétablir

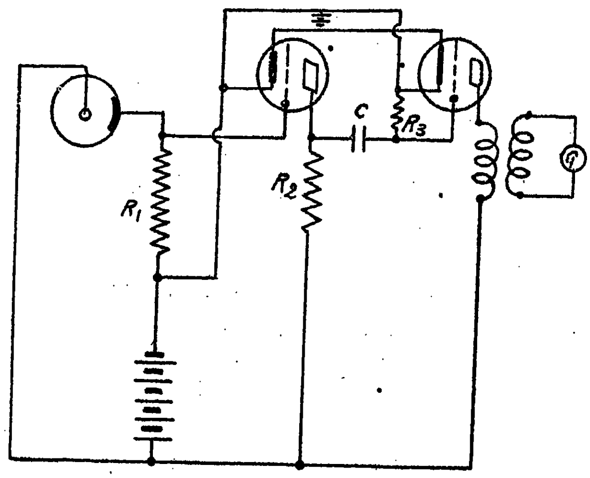


Fig. 29.

On substitue alors l'étalon dont on règle la distance de façon à ne pas dérégler l'équilibre.

Un autre procédé également préconisé par Sharp est le suivant (fig. 29).

Le courant photoélectrique traverse une résistance élevée qui est intercalée entre le filament et la grille d'un amplificateur à très basse fréquence à liaison par condensateur, un galvanomètre est en court-circuit dans le secondaire d'un transformateur placé dans la plaque de la dernière lampe.

R_1 = 10 mégohms, R_2 = 50 000, R_3 de 100 000 à 1 mégohm C = 5 microfarads.

Nous n'avons figuré que 2 lampes, pratiquement il en faut 3.

Par un procédé quelconque, on substitue *rapidement* la lampe à étalonner et l'étalon. S'ils envoient le même flux lumineux dans la cellule, le galvanomètre (qui ne doit pas avoir une période trop longue) reste au repos.

Les cellules photoélectriques donnent un courant dans l'obscurité. Ce courant noir est dû, pour partie, à l'isolement de la cellule, pour partie à des phénomènes encore mal connus. En tout cas, si par exemple on mesure le courant avec un galvanomètre, il faut prendre le zéro dans l'obscurité mais sans couper la batterie donnant le potentiel accélérateur.

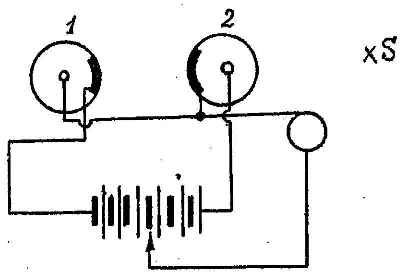


Fig. 30.

Ce courant a l'inconvénient d'être variable. Il convient de vérifier assez fréquemment sa valeur.

On peut le compenser par l'artifice suivant employé au National Physical Laboratory (fig. 30).

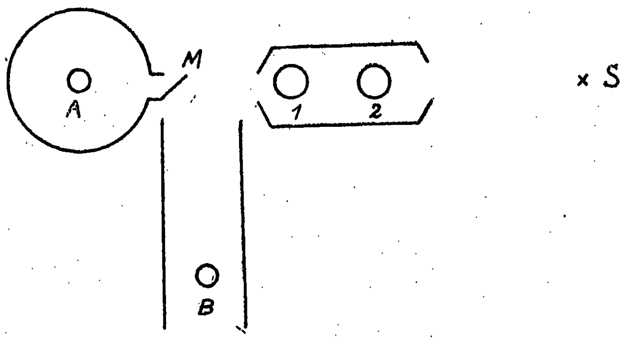


Fig. 31.

On voit que les courants des 2 cellules se retranchent. Si la cellule 2 a un courant d'obscurité plus faible que celui de 1, on peut en éclairant faiblement S ramener le galvanomètre à zéro.

Le dispositif final est le suivant (fig. 31).

Les 2 cellules sont en 1 et 2 montées comme dans la figure précédente et entourées de façon à être à l'abri de la lumière.

La lampe S permet dans l'obscurité de ramener le courant à zéro.

La lampe à étudier A est dans un lumenmètre diffusant. Un miroir

mobile M permet d'envoyer sur la cellule 1, soit la lumière sortant du lumenmètre, soit celle d'une lampe B.

On règle la distance de B au photomètre de façon à ce que la manœuvre du miroir ne fasse pas varier la déviation du galvanomètre. On connaît la distance optique d de B à la cellule, on connaît le rendement ρ du miroir. On a donc

$$K\Phi = \frac{B\rho}{d^2}.$$

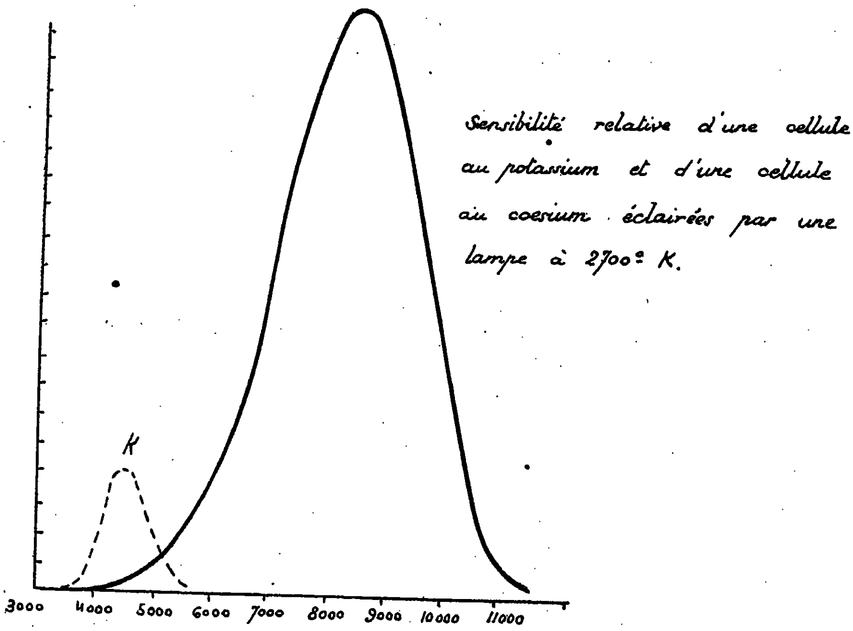


Fig. 32.

On substituera une lampe de flux connu. On aura

$$K\Phi' = \frac{B\rho}{d'^2}$$

d'où

$$\frac{\Phi}{\Phi'} = \frac{d'^2}{d^2}.$$

Ces procédés étant compliqués, la nécessité d'amplifier était une grosse suggestion.

La découverte des cellules ayant des maximum de sensibilité déplacés vers le rouge, c'est-à-dire ayant leur maximum de sensibilité dans des régions où nos sources usuelles rayonnent une quantité notable d'énergie, a modifié la position de la question.

Nous donnons d'après Ives les sensibilités relatives de deux cel-

lules dans le vide, l'une à l'hydrure de potassium, l'autre à l'oxyde de caesium. Ces courbes (fig. 32) ne sont plus rapportées comme les précédentes à des spectres d'égale énergie, mais au spectre produit par une lampe au tungstène à 2 700° K.

On voit le gain notable induit par le caesium.

Voici du reste des résultats obtenus au Laboratoire Central d'Electricité sur des cellules éclairées par une lampe à atmosphère gazeuse assez poussée (2 000° K environ).

Cellule au potassium dans le gaz :

Tension 100 V, 10 microampères par lumen.

Cellule au caesium dans le gaz :

Tension 90 V, 70 microampères par lumen.

Cellule au caesium dans le vide :

40 V, 25 microampères par lumen.

Avec les cellules dans le vide, ayant une surface assez grande pour que la fraction de lumen qui agit sur la matière sensible soit assez importante, on peut mesurer le courant photoélectrique produit par des éclairements de 10 à 30 lux avec un galvanomètre sensible.

Le problème est donc bien simplifié de ce fait.

Peut-on admettre la proportionnalité du courant photoélectrique à l'éclairement sur la cellule ou faut-il opérer par substitution comme nous l'avons dit plus haut ?

Quelques précautions sont encore nécessaires. Il faut déduire des lectures du galvanomètre le courant d'obscurité et s'assurer de temps à autre au cours des mesures qu'il n'a pas varié.

Il faut que le flux lumineux qui entre dans la cellule tombe sur une surface importante de la matière sensible de façon à avoir un effet moyen. L'expérience montre qu'il y a d'un point à un autre de grandes différences de sensibilité.

Il ne faut pas déplacer la cellule au cours des mesures et autant que possible utiliser des cellules construites de telle façon que la surface de matière sensible intéressée varie peu avec la distance de la lampe à la cellule.

Les auteurs ne sont pas d'accord sur la possibilité d'admettre que l'intensité du courant photoélectrique est proportionnelle à l'éclairement, du moins quand il s'agit de mesures de haute précision.

Harrisson admet qu'avec certaines cellules des erreurs de 1 pour cent peuvent être introduites si l'éclairement varie de 1 à 3.

Campbell est d'une opinion contraire.

De même Harrisson attire l'attention sur ce fait que la sensibilité de la cellule varie avec le temps

D'après CAMPBELL au contraire, à condition de ne pas envoyer sur la cellule un flux lumineux trop considérable, la sensibilité de la cellule ne varie pas de plus de 1,5 pour cent après une journée d'éclairement.

En résumé, on peut dire que toutes les cellules photoélectriques peuvent être utilisées par la méthode de substitution ; si au contraire on veut admettre la proportionnalité du courant au flux, il est nécessaire de vérifier par une étude préalable les propriétés de la cellule et au cours des mesures de revenir de temps à autre sur un point déjà fait pour contrôler qu'on obtient bien le même résultat.

Nous pouvons dire qu'au Laboratoire Central d'Electricité, nous avons déterminé le flux lumineux d'une lampe en mesurant l'intensité lumineuse dans diverses directions au moyen d'une cellule sélectionnée.

Les résultats ont concordé à 2 pour cent près avec les mesures visuelles et la précision de celles-ci ne permet pas d'espérer mieux.

Comparaison des lampes à température de coloration différente. — Jusqu'ici nous avons envisagé l'emploi de la cellule pour la comparaison de lampes fonctionnant à la même température et surtout pour le problème, très important à l'heure actuelle, de tracer des courbes de répartition lumineuse dans diverses directions. La cellule permet de tracer très rapidement ces courbes à une échelle arbitraire, échelle qu'on détermine ensuite par quelques mesures visuelles.

Le problème est tout autre si on veut comparer des lampes à des températures différentes puisque la courbe de sensibilité de la cellule est très différente de celle de l'œil.

Il semble que celle dont la sensibilité serait la plus voisine de celle de l'œil serait celle au sulfure de caesium.

Supposons qu'on éclaire une cellule par une surface de corps noir à la température T soit i l'émission photoélectrique, une variation de T entraînera une variation de i de l'émission, en même temps une variation $d\varphi$ du flux lumineux (déterminé en fonction des facteurs de visibilité) émis par la source lumineuse.

Il faudrait que l'on ait :

$$\frac{1}{i}\frac{di}{dT} = \frac{1}{\varphi}\frac{d\varphi}{dT}.$$

ce qui peut être remplacé par

$$\frac{d \log i}{d \log T} = \frac{d \log \varphi}{d \log T}$$

Au voisinage de 2 500° K

$$\frac{d \log \varphi}{d \log T} = 5{,}47.$$

On trouve pour

$$\frac{d \log i}{d \log T}$$

Potassium	7,88
Rubidium	7,27
Caesium	5,69.

Il semble qu'on puisse avec le caesium arriver à se rapprocher de l'œil (caesium massif et peu sensible). Mais n'oublions pas que nous avons montré que le caesium oxydé sur argent ne pouvait avoir toutes les courbes de sensibilité possible jusqu'à le rendre sensible à l'infra-rouge.

Bref on ne peut pas compter sur une cellule sensible et ayant les mêmes propriétés que l'œil.

On a proposé divers filtres qui devaient modifier la sensibilité de l'ensemble.

Pour les anciennes cellules au potassium on employait un écran Wvatten K_3.

Pour les cellules à oxyde de caesium les filtres varièrent d'une cellule à l'autre, tantôt un filtre ambré, tantôt un filtre bleu, et encore on n'obtient jamais la même couche de sensibilité que l'œil.

On peut dire qu'au point de vue photométrie hétérochrome, l'emploi des cellules est encore impossible.

Les cellules à oxyde de cuivre. — Une nouvelle cellule photoélectrique réalisée très récemment semble promettre des résultats très intéressants au point de vue des applications de la photoélectricité.

C'est la cellule à oxyde de cuivre.

Nous avons vu que la présence d'un corps électro-négatif comme l'oxygène semble faciliter la sortie des électrons du métal.

D'autre part quand les électrons sont sortis, il est nécessaire pour les amener à l'anode de les placer dans un champ accélérateur pour surmonter leur répulsion réciproque. Il n'en serait plus de même si on pouvait placer cette anode au contact de la substance photoélectrique.

Les électrons qui ont absorbé un photon tel qu'ils aient une énergie un peu supérieure à celle qui est nécessaire pour les faire sortir du métal arriveraient tous à l'anode.

Tels sont probablement les principes du fonctionnement des cellules à oxyde de cuivre réalisées par LANGE et SCHOTTKY en Allemagne et par P. AUGER et LAPICQUE en France.

Voici comment sont réalisées ces cellules.

Par oxydation dans l'air, une lame de cuivre est recouverte d'une mince couche de Cu^2O (sous-oxyde de cuivre) de façon à donner les colorations de lames minces.

L'une des faces est décapée. Celle qui reste oxydée est recouverte par pulvérisation cathodique d'une mince couche d'or ou d'argent tellement mince qu'elle est transparente à la lumière.

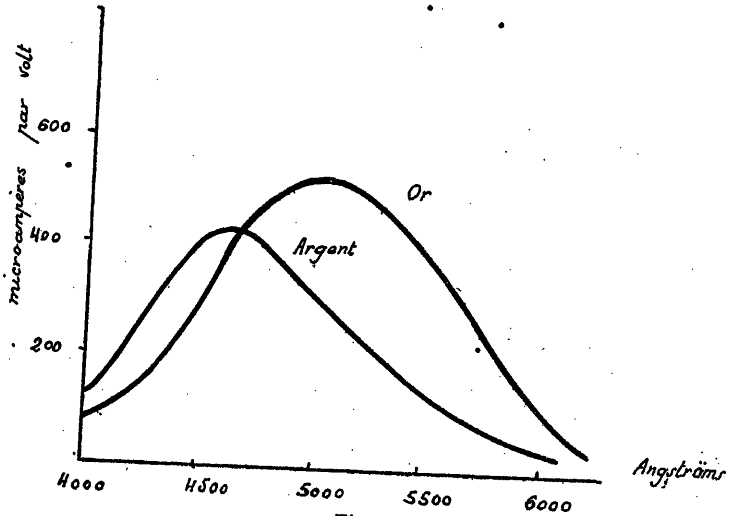


Fig. 33.

Si on éclaire la surface oxydée à travers cette couche, on constate dans un conducteur extérieur réunissant la lame de cuivre à la lame mince d'argent ou d'or, la production d'un courant allant du Cu à la lame mince.

La figure 33 donne la sensibilité spectrale dans le spectre d'égale énergie de deux semblables cellules.

Cette sensibilité dépend de la couche d'oxyde et de la pellicule métallique.

AUGER et LAPICQUE ont pu constater que la différence de sensibilité spectrale des deux cellules dépend de la transparence à la lumière de la couche mince.

La diminution qui se manifeste à partir de 5 000 Angströms semble due à un effet photo-électrique inverse provoqué par ce fait que la pellicule d'oxyde de cuivre laisse passer des rayons jaunes et rouges.

Ce sont surtout les cellules à l'or qu'on peut utiliser.

Nous avons eu l'occasion d'employer au Laboratoire Central d'Electricité une semblable cellule.

Voici les résultats constatés.

La cellule utilisée bien entendu sans aucune force électromotrice extérieure ne présentait aucun courant d'obscurité. Sa résistance était d'environ 1 500 ohms. Pour l'employer on la mettait purement et simplement en série avec un galvanomètre sensible

$$(1 \text{ millimètre} = 2 \times 10^{-9} \text{ A}).$$

Pour des lampes de 20 bougies de diverses natures placées à une certaine distance les résultats ont été les suivants :

Nature de la lampe Intensité en bd		*Déviation au galvanomètre*
20	carbone	23
20	tungstène dans le vide 2 360	23,5
20	Atmosphère gazeuse 2 700° K	25

La sensibilité comme on le voit n'est pas encore celle de l'œil. Mais la cellule étudiée s'en éloigne moins que les cellules photoélectriques ordinaires.

A la lumière d'une lampe au tungstène à 2 700° K sa sensibilité est de 100 microampères par lumen — alors que les meilleures cellules ordinaires donnent 20 μA/lumen.

La cellule utilisée avait un diamètre de 16 milliampères, jusqu'à 30 lux le courant photo-électrique était rigoureusement proportionnel au flux reçu. A partir de cette valeur, la proportionnalité diminuait peu à peu. La sensibilité de la cellule étudiée variait avec la température.

Dans les limites de proportionnalité indiquée, il était possible de placer devant la cellule un disque de Talbot.

Ces cellules ne peuvent pas remplacer complètement l'œil pour la photométrie.

Mais chaque fois qu'il y a à comparer des lampes de même couleur, elles sont fort utiles.

Nous citerons par exemple leur emploi au Laboratoire Central pour la comparaison de lampes étalons à filament de carbone, comparaison qui se faisait immédiatement à un ou deux millièmes alors qu'on ar-

rivait à peine à ce résultat en prenant la moyenne de nombreuses mesures visuelles.

Une autre application très importante en photométrie est la détermination du solide photométrique d'un appareil d'éclairage, c'est-à-dire du solide fictif obtenu en portant sur des vecteurs partant du centre de l'appareil une longueur proportionnelle à l'intensité lumineuse dans cette direction.

Lorsque le solide photométrique est de révolution et que sa méridienne est assez régulière, le problème ne présente pas de difficultés. Il suffit de faire les mesures sur une méridienne, pour des directions de 10 en 10°.

Mais lorsque, sur un méridien quelconque, la courbe photométrique présente de nombreuses parties ayant parfois des ouvertures de l'ordre de un degré et qu'en outre l'appareil est fortement dissymétrique (dissymétrie souvent voulue) il est nécessaire, pour caractériser l'appareil et calculer son flux lumineux, de faire un très grand nombre de mesures. Si on envisage que dans chaque direction il est nécessaire de faire dix pointés photométriques, le problème est inextricable. Il est au contraire très facile avec la cellule qui ne nécessite qu'une lecture.

On peut si on le veut, en un temps très court, faire des mesures sur un méridien en des latitudes qui ne diffèrent que de 1 degré et répéter l'opération sur un très grand nombre de méridiens.

C'est le procédé employé au Laboratoire Central d'Electricité où on a également réalisé un dispositif permettant de recevoir le spot du galvanomètre sur du papier photographique animé d'un mouvement convenable de sorte qu'on peut relever automatiquement en quelques instants et d'une façon continue la courbe en coordonnées polaires de l'intensité lumineuse dans un méridien.

Nous ne sommes qu'au début de l'emploi de ces cellules, mais les résultats obtenus semblent déjà très encourageants.

Nous répétons toutefois que certaines précautions sont à prendre. Il faut, chaque fois qu'on s'en sert, les étalonner par une mesure visuelle.

Enfin elles n'ont pas encore résolu le problème de la photométrie hétérochrome.

LA CUISINE COMMERCIALE A L'ÉLECTRICITÉ [1]

par M. Jean GRANMASSON

Ingénieur E. C. P.,

Chef du Bureau de propagande de la C. P. D. E.

(*Analyse d'une communication présentée à l'Institution of Electrical Engineers, par* M. T. SETTLE).

DÉFINITION DE LA CUISINE COMMERCIALE

L'auteur définit la cuisine commerciale comme étant celle qui s'applique à toutes les opérations culinaires effectuées à l'intention d'un grand nombre de personnes ou d'une manière plus précise d'un nombre de personnes plus grand que celui généralement rencontré dans un foyer domestique.

La cuisine commerciale englobe donc les établissements en communauté tels que : hôpitaux, pensionnats, ouvroirs, pénitenciers, asiles ; les établissements patronaux tels que : restaurants et réfectoires à l'usage du personnel ; les établissements commerciaux tels que : pensions de famille, hôtels, restaurants ; les installations destinées à débiter à un grand nombre de consommateurs des spécialités culinaires comme par exemple les grill-room et surtout en Angleterre les boutiques de poissons frits. (Pour mémoire : la cuisine électrique dans les paquebots et dans les trains).

AVANTAGES DE LA CUISINE A L'ÉLECTRICITÉ

Dans ce chapitre, l'auteur indique les avantages de l'électricité employée pour la cuisson des aliments et qui sont : la propreté, la rapidité et l'économie.

Propreté. — Suppression de l'emmagasinage, de la manutention et de l'évacuation des combustibles et cendres, suppression des fumées, des poussières et des mauvaises odeurs ayant comme conséquence la suppression des conduits d'évacuation de fumées.

---

(1) Communication présentée dans la séance du 13 avril de la 2e Section de la Société française des Electriciens, sous la présidence de M. JOUAUST

Rapidité. — La rapidité est liée à la nature de l'outillage dont on dispose. Possibilité de disposer immédiatement par le jeu de quelques commutateurs de la chaleur dont on a besoin et sur un appareil déterminé ou en un point de celui-ci.

Economie. — Due à ce que la presque totalité de l'énergie consommée par les appareils électriques est utilisée à la cuisson des aliments. Presque tous les appareils culinaires sont parfaitement calorifugés, ce qui supprime les pertes d'énergie par rayonnement. De plus il est possible de régler avec la plus grande précision le débit calorifique ; une fois ce débit réalisé, il reste uniforme pendant tout le temps nécessaire.

En ce qui concerne la cuisson des rôtis au four électrique, la perte de poids est grandement diminuée du fait que la facilité de réglage de température des fours dispense d'ouvrir constamment la porte pour surveiller la marche de la cuisson et que la suppression de toute circulation gazeuse autour des rôtis, par suite de l'absence de combustion, permet une fermeture hermétique du four. La viande cuisant ainsi dans une atmosphère saturée d'humidité perd, de ce fait, moins de poids qu'avec toute autre sorte de four.

L'auteur indique un chiffre de 10 pour cent qui nous semble un peu trop élevé.

Le choix de l'équipement dépend du genre d'établissement

L'auteur indique que l'équipement d'une cuisine électrique dépend :

1° du genre d'établissement. L'équipement sera en effet tout à fait différent s'il s'agit d'un réfectoire pour le personnel ou d'un hôtel. L'équipement sera également en fonction du nombre de repas à servir.

L'auteur insiste ensuite sur le soin qu'il faut apporter à l'installation électrique qui doit être soigneusement conçue et parfaitement réalisée. Il est recommandable en particulier de faire aboutir tous les circuits de chauffage à un tableau principal de coupure et de distribution. Ces circuits seront accessibles et placés de telle manière qu'ils ne puissent être inondés pendant le nettoyage des locaux.

Début et évolution de la cuisine commerciale a l'électricité

La première installation électrique signalée par l'auteur est celle de la Maison Pimm Brothers à Dublin, construite vers 1907 ou 1908.

Nous signalons que contrairement à ce que pense l'auteur, la plus ancienne installation de cuisine électrique que l'on connaisse est celle du restaurant La Féria à l'exposition de 1900 à Paris. Les résistances chauffantes étaient réalisées par des agglomérés.

POURQUOI LA CUISINE ÉLECTRIQUE COMMERCIALE A-T-ELLE DU SUCCÈS PRINCIPALEMENT DANS LES HOPITAUX, CANTINES, RÉFECTOIRES, etc...

L'auteur semble attacher une grande importance au fait que les chefs cuisiniers font de grandes difficultés pour adopter un nouveau procédé de cuisson et que c'est la raison pour laquelle la cuisine électrique se développe principalement dans les hôpitaux, cantines et réfectoires, où le choix du matériel est fait par la direction et non par le chef de cuisine.

En ce qui concerne Paris, il nous semble que la majorité d'entre les chefs accepte volontiers la cuisine électrique et les modifications de leurs habitudes, et si les réfectoires électriques sont susceptibles de se multiplier plus que les restaurants à Paris, cela provient surtout, à notre avis, de ce que les conditions économiques sont meilleures dans le cas du réfectoire pour deux raisons :

1° La consommation d'électricité par repas servi est moindre, à cause de la simplification de la carte, ce qui permet d'utiliser, sur une plus grande échelle, les appareils spécialisés à grand rendement (marmites, friteuses) et très peu le fourneau. La consommation spécifique dans un réfectoire ne dépasse pas 50 pour cent de celle d'un restaurant moyen pour le même nombre de repas.

2° Dans l'application du tarif spécial dit Triple Tarif, en vigueur à Paris, le prix moyen du kWh ressort à un chiffre peu élevé qui comporte pour les réfectoires une proportion élevée de courant de nuit (75 pour cent) et une proportion insignifiante ou même nulle de courant de pointe.

Il est nécessaire de ne montrer aucune idée préconçue pour tirer plein profit de l'électricité en matière culinaire.

Il est certain que pour obtenir pleine satisfaction du matériel de cuisine, le dernier en date, celui-ci doit être essentiellement conçu en vue du chauffage à l'électricité et qu'il ne saurait être question de transformer un modèle quelconque de fourneau à charbon en vue de cet usage. Au début de la cuisine électrique, comme le signale l'auteur, les grandes lignes des appareils à charbon avaient été conservées dans le matériel électrique, mais actuellement on peut parler d'appareils spécifiquement électriques de cuisine commerciale. Le

chauffage électrique permet, en effet, de concevoir les appareils culinaires sous un jour entièrement nouveau, par suite de l'absence complète des produits de combustion. Suivant le genre de cuisine que l'on a à exécuter, on peut, par exemple, dans un restaurant à la carte où travaillent de nombreux cuisiniers, ayant chacun sa spécialité, disposer d'appareils de différents types ayant chacun des fins bien définies. On trouvera par exemple, des fours, des marmites à légumes, des plaques à feu lent et à feu vif séparés les uns des autres et mis individuellement à la disposition des rôtisseurs, des sauciers, des entremettiers, etc...

L'électricité permet seule de séparer commodément les différents appareils, en vue de cette spécialisation du travail, ce qui accroît grandement la souplesse et le rendement des opérations dans les grandes cuisines modernes.

TYPES D'APPAREILS DE CUISINE COMMERCIALE

Le four. — Le four électrique de cuisine est bien connu en France où il est très apprécié, non seulement des restaurateurs, mais encore des charcutiers, pâtissiers, boulangers...

Le four électrique, constitué par une chambre de cuisson calorifugée comportant deux éléments chauffants, l'un à la partie supérieure ou voûte, l'autre à la partie inférieure ou sole, possède une régularité de marche qu'il n'est pas possible d'obtenir avec les fours à combustion. Dans ceux-ci, en effet, il est difficile de régler, d'une façon précise, l'apport de chaleur fourni par le foyer ; de plus, la flamme, portée à une température trois ou quatre fois supérieure à celle de la chambre, risque de produire l'accident fréquent appelé « coup de feu ». Au contraire, l'élément chauffant d'un four électrique n'est porté qu'à une température très peu supérieure à celle de la chambre; le coup de feu n'est donc pas à craindre.

Enfin, les commutateurs commandant chaque élément de chauffe du four électrique donnent trois allures et permettent un réglage précis de la cuisson. Il faut ajouter que la possibilité de mettre en service à son gré la sole ou la voûte, est très intéressante pour la pâtisserie ; on peut ainsi obtenir la cuisson de la pâte en chauffant la partie inférieure du four, puis dorer rapidement en chauffant la voûte.

D'autre part, l'excellent calorifugeage des fours électriques, qui empêche la chaleur de se perdre dans la pièce, les rend économiques.

A remarquer aussi que la chambre de cuisson parfaitement close se sature d'humidité et empêche les pièces de se dessécher pendant la

cuisson. Il en résulte que la perte de poids, pour les rôtis par exemple, qui est de l'ordre de 15 pour cent avec les anciens fours à charbon, n'est plus que de 10 pour cent avec les fours électriques. Il y a là une économie importante qui est souvent supérieure à la dépense nécessitée par la cuisson.

La puissance par unité de volume est, en France, du même ordre que celui indiqué par l'auteur, c'est-à-dire de 25 à 30 W : dm^3. Ce chiffre n'a d'ailleurs pas une importance considérable ; en effet, la puissance maximum du four n'est utilisée que pour la mise en chauffe préalable ; en cours de cuisson, on utilise les allures intermédiaires.

Le temps de mise en chauffe préalable est plus ou moins grand suivant la puissance maximum spécifique choisie.

En France, la puissance spécifique est généralement indiquée par unité de surface de sole. On adopte alors les chiffres suivants :

Four à pâtisserie : 5 kW : m^2.

Four à rôtir : 7 kW : m^2.

Les éléments chauffants sont toujours, en France, placés à la sole et à la voûte.

Nous sommes étonnés d'apprendre que certains constructeurs anglais placent les éléments sur les côtés, disposition à notre avis incorrecte.

Les éléments chauffants sont, en France, constitués par un fil de nickel-chrome enroulé en spirale et supportés par des poulies en stéatite.

Le fourneau. — Le fourneau à charbon comporte, au-dessous de sa table de chauffe, des fours à rôtir. Cette disposition est imposée par la nécessité d'assurer, au moyen d'un foyer unique, le chauffage des fours et des plaques.

Les foyers à chauffage électrique sont indépendants les uns des autres puisqu'ils sont, chacun, contrôlés par un commutateur.

L'emploi de l'électricité permet donc d'adopter, pour un fourneau, une disposition différente de celle qu'on a l'habitude de rencontrer sur le matériel au charbon. Il présente, en outre, une très grande sécurité et une très grande souplesse puisque chaque cuisson peut être conduite indépendamment.

Le plus souvent, les fours et les plaques chauffantes électriques formant deux appareils distincts, on y perd un peu de place, mais on rend le travail plus commode, et plus sûr : le saucier, le poissonnier, le rôtisseur, ne peuvent plus se gêner mutuellement ; de plus, les opérations au four sont plus faciles si celui-ci, au lieu d'occuper la partie basse d'une cuisinière, est mis à portée de la main. Ajoutons

que, si la place fait défaut, on peut toujours grouper four et plaque sur un même bâti.

La partie essentielle du fourneau électrique est la plaque chauffante qui se présente sous deux types très différents : le foyer à feu visible qui, porté à haute température, chauffe par rayonnement, et la plaque à résistances cachées, qui chauffe par conductibilité.

Dans le foyer à feu visible, l'élément chauffant est placé dans les rainures d'une plaque en matière réfractaire qui sert à la fois de support, d'isolant et de protection mécanique. Ce système a l'avantage de fournir une assez grande puissance par unité de surface (6 W : cm^2) et de donner des températures assez élevées (700 à 800° C). Les résistances chauffantes sont, par contre, exposées aux agents oxydants dont les graisses ne sont pas les moins actifs ; elles présentent donc moins de robustesse que les plaques à résistances noyées, mais, en cas de claquage d'un élément, il est très simple et peu coûteux de remplacer l'élément détérioré. A noter que l'arrêt du fonctionnement d'un seul élément n'empêche pas le fonctionnement des autres.

La plaque à résistances cachées comporte une armature en fonte, en forme de cylindre très aplati, dont la surface supérieure est dressée.

Les éléments chauffants sont placés à l'intérieur de l'armature et sont, le plus souvent, noyés dans un ciment spécial qui sert de support, d'isolant, et assure la protection mécanique.

La plaque chauffante, qui permet de mettre en jeu une puissance de 4 à 4,5 W : cm^2, puissance analogue à celle qu'indique l'auteur, transmet sa chaleur surtout par conductibilité. Pour faciliter cette transmission, on utilise des récipients à fond dressé, d'une épaisseur suffisante pour résister aux déformations ; on a, ainsi, un contact parfait des deux surfaces en présence, d'où résulte un bon rendement.

Les plaques chauffantes peuvent durer plusieurs années sans subir aucune avarie.

Les deux systèmes qui viennent d'être décrits permettent l'un et l'autre d'effectuer parfaitement toutes les cuissons, notamment les omelettes et les sautés qui demandent un feu très vif et dont la préparation constitue un critérium permettant d'apprécier la puissance de chauffe des appareils de cuisine.

Les différents éléments du fourneau électrique possèdent au moins trois allures de chauffe réglables par un simple commutateur.

En ce qui concerne la plaque à résistances cachées, il existe en France :

1° des plaques circulaires dites de cuisson de 18, 22, 30, 40 cm de diamètre avec des puissances spécifiques de l'ordre de 4 à 4,5 W:cm².

2° des plaques rectangulaires de cuisson ayant environ 25 cm×60 cm, à résistances noyées, et dont les puissances spécifiques sont du même ordre que les précédentes.

3° des plaques à mijoter rectangulaires dont la puissance spécifique est de l'ordre de 1 à 1,5 W:cm².

Le gril. — Les différents modèles de grils se rattachent à deux types très différents : les grils à feu visible qui chauffent par rayonnement et dans lesquels la grillade n'est pas en contact avec le corps de chauffe ; les grils à chaleur obscure, dans lesquels la grillade est en contact avec la partie chaude de l'appareil.

Les grils à feu visible n'ont qu'une seule allure de fonctionnement (la puissance maximum) et donnent toujours la plus haute température possible ; ceux du modèle à résistance noyée ont deux ou trois allures, l'allure faible est, en effet, suffisante pour les maintenir en température entre deux cuissons.

La puissance maximum des modèles en service dans les restaurants varie de 2,5 à 15 kW.

1° *Gril à feu visible.* — Dans ce groupe se trouvent :

a) les appareils dont les résistances sont placées dans un tube de quartz qui leur sert de support et les protège des projections de liquides ;

b) ceux dont les éléments chauffants sont des crayons en agglomérés ;

c) ceux dont les éléments sont constitués, comme certaines plaques chauffantes à feu vif, par un conducteur métallique placé sur des porcelaines réfractaires.

Les éléments sont placés, soit horizontalement à la partie supérieure ou inférieure du gril, soit verticalement de part et d'autre d'un panier dans lequel on place la pièce à griller.

2° *Gril à chaleur obscure.* — Dans cette catégorie se place le gril à résistances cachées dont la construction est identique à celle des plaques chauffantes du même nom. La forme du gril est rectangulaire et sa face supérieure, sur laquelle s'opère la cuisson, est cannelée, et légèrement inclinée pour permettre l'écoulement du jus de viande.

Les grils doivent-ils être à chauffage par en dessus ou par en dessous ? L'auteur signale que cela n'a aucune importance au point de vue culinaire.

La raison pour laquelle les cuisiniers français n'admettent pas le

gril à chauffage supérieur se trouve dans le fait que les viandes grillées dans ces appareils ne sont pas quadrillées comme celles qui sont cuites dans le gril classique.

Ce quadrillage n'a aucune utilité et la question est du pur domaine de l'esthétique ; cependant l'objection est grave. Aussi les seuls grils électriques utilisés en France appartiennent à une des catégories ci-dessous :

1° Plaque de fonte à partie supérieure cannelée et au-dessous de laquelle sont placés les éléments chauffants noyés dans un ciment spécial.

2° Gril ayant la forme d'un gril à charbon, c'est-à-dire comportant des barreaux d'acier, au-dessous desquels sont placés les éléments chauffants. Ces derniers sont protégés par une tôle en acier inoxydable, même aux hautes températures. En marche normale, la tôle d'acier est portée au rouge clair.

3° Gril à chauffage supérieur et comportant des barreaux chauffants permettant de quadriller.

La marmite. — Les marmites électriques sont indispensables, et d'ailleurs très pratiques, pour la cuisson des légumes, du pot au feu, etc... Elles sont même, pour les réfectoires, la partie essentielle du matériel. Leur capacité est comprise entre 25 et 400 litres. Elles sont de construction simple et comprennent un récipient en aluminium, en fonte ou en nickel, de forme cylindrique. L'élément chauffant est, pour la plus grande partie, placé sous le fond de la marmite, le reste entoure le tiers inférieur de la paroi verticale.

L'ensemble est calorifugé et fixé dans un deuxième récipient en tôle d'acier, muni le plus souvent d'un tourillon. La marmite est alors basculante par le jeu d'un volant entraînant une vis sans fin et les manœuvres de vidange sont très commodes. La puissance mise en jeu est proportionnelle à la capacité ; elle est de 10 à 12 kW pour 100 litres de capacité. Le réglage se fait sur trois ou quatre allures différentes. Grâce à leur bon isolement thermique, les marmites électriques ont un rendement excellent qui rend leur emploi très économique.

La friteuse. — Les fritures se font dans des bacs amovibles, munis d'éléments chauffants et de construction semblable à celle des marmites. Leur forme, seule, est différente ; elle est le plus souvent rectangulaire. De plus les récipients ne font pas, en général, corps avec le reste de l'appareil mais s'encastrent dans un châssis en tôle d'acier qui comporte le calorifugeage et les éléments chauffants.

Les friteuses peuvent être munies de tourillons et basculer comme les marmites.

En France, les friteuses sont de puissance plus élevée que celle indiquée par l'auteur, soit 200 à 300 W par dm^3 d'huile au lieu de 150 à 180 W.

La salamandre. — La salamandre électrique est comparable à un gril à feu supérieur. L'élément chauffant, porté à haute température, glace par rayonnement.

La table chaude. — Les tables chaudes et chauffe-assiettes électriques sont d'une construction très simple et d'une grande robustesse.

On aura souvent intérêt à installer une table chaude dans la salle même du restaurant pour permettre au maître d'hôtel d'y faire son découpage.

Le chauffe-plats. — Certains plats qui demandent à être maintenus chauds pendant la dégustation, les tripes par exemple, seront très heureusement servis sur des chauffe-plats électriques alimentés par des prises de courant disposées sous les tables. On évitera ainsi le maniement du réchaud à alcool, peu pratique.

Percolateur. — Pour la préparation de quantités importantes de café, on utilisera le percolateur électrique, dont la construction est comparable à celle des anciens modèles, à cela près que le chauffage est assuré par un corps de chauffe électrique.

Frais d'entretien des appareils de cuisine électrique. — L'auteur signale la question des frais d'entretien des appareils de cuisine électrique et note que ceux-ci ne dépassent pas pratiquement et annuellement 1 à 1,5 pour cent du prix de l'installation pour les hôpitaux et réfectoires et 3 à 5 pour cent du prix de l'installation pour les grands restaurants.

Les installations en France sont actuellement trop peu nombreuses et trop nouvelles pour que nous puissions avoir une idée très précise sur la question.

La question de la cuisine commerciale du point de vue des compagnies distributrices.

L'auteur signale que le développement de la cuisine électrique commerciale sur une grande échelle dépend avant tout de la tarification

appliquée et l'expérience a montré que la cuisine électrique commerciale devient intéressante en Angleterre quand l'énergie est fournie à 0,35 f par kWh, condition que nous avons également trouvée à Paris et qui est du reste celle qui est réalisée pour les restaurants dans le cas de l'alimentation par courant haute tension, et pour les réfectoires dans tous les cas.

Actuellement, les compagnies distributrices sont disposées, dans leur majorité, à accorder des tarifs spéciaux à la cuisine commerciale, tant en raison de leur grosse consommation, que de l'insertion de leur demande pour la plus grande partie dans le creux de la courbe journalière de charge.

En ce qui concerne les grands restaurants de Paris, on peut dire que la pointe de ceux-ci a lieu vers 13 h et après 18 h, c'est-à-dire dans les creux. La consommation de pointe existe, mais est relativement minime.

En ce qui concerne les réfectoires, on peut dire qu'il n'y a pas de consommation de pointe.

Comme le fait observer l'auteur, la consommation d'énergie par repas est très variable, suivant le genre d'établissement, l'importance de la carte et la façon d'utiliser les appareils. Les chiffres que nous avons observés à Paris sont compris entre 0,4 kWh pour les réfectoires à 2 kWh pour les restaurants.

SUR LA DÉFINITION TECHNIQUE DES GÉNÉRATRICES ET DES RÉGIMES DE SOUDURE ÉLECTRIQUE (1)

par M. Marcel MATHIEU.

La séance de discussions de la troisième section de l'année dernière a été consacrée à la Soudure électrique et M. BRILLIÉ, représentant l'Institut de Soudure autogène, a émis le vœu que les Electriciens et les Soudeurs se mettent d'accord pour définir les régimes de soudure et les caractéristiques d'une bonne génératrice de soudure.

Je ne prétends pas apporter aujourd'hui une solution à ces problèmes, mais je tiens simplement à les poser, afin que chacun puisse y apporter ses idées et ses arguments.

Je crois qu'il faut procéder par ordre et que le problème posé par M. BRILLIÉ doit être décomposé en trois parties :

1° *Définition et recherche des conditions d'équivalence des régimes de soudure par résistance.*

2° *Définition des régimes de soudure à l'arc.*

3° *Caractéristiques spéciales d'une génératrice de soudure.*

Nécessité de ces définitions.

La nécessité de ces définitions est évidente.

A la suite des comptes rendus de notre séance de discussions par MM. LANGUEPIN et BRILLIÉ à la réunion de la Société des Ingénieurs Soudeurs du 17 décembre 1931 présidée par M. R. THOMAS, ce dernier a fait remarquer que partout en soudure électrique, par résistance ou à l'arc, la question de puissance était à mettre au point et annonçait ainsi les problèmes qu'il faut résoudre et que j'essaie de poser actuellement.

La solution n'est pas immédiate mais la collaboration étroite de la Société des Ingénieurs Soudeurs et de la Société Française des Electriciens doit aboutir à des résultats heureux.

Le problème étant posé je me bornerai à donner quelques idées, peut-être un peu trop personnelles, sur la première partie.

(1) Ce rapport sera discuté à la réunion du 21 novembre 1932 de la Semaine de discussions de la Société française des Electriciens.

Remarques sur la définition et la recherche des conditions d'équivalence des régimes de soudure par résistance

Il apparaît assez facile de définir un régime de soudure par résistance.

En effet, il semble assez bien défini par :

1° la dimension des pièces à souder : (barres de section déterminée par exemple).

2° la durée d'une soudure.

3° la fréquence des soudures successives.

La difficulté commence immédiatement si l'on veut définir un régime électrique qui exige la connaissance de l'énergie dépensée pour la soudure.

Un problème se pose : L'énergie dépensée pour une soudure donnée est-elle bien définie ? Comment varie-t-elle ?

L'expérience prouve que l'énergie dépensée pour effectuer une soudure donnée, est variable avec la durée de l'opération.

En fait, nous avons les variables suivantes :

diamètre des barres à souder, par exemple, d en millimètres

consommation d'énergie nécessaire pour une soudure : j en joules,

puissance moyenne durant la soudure : P en kilowatts,

durée d'une opération : t en secondes,

durée minima entre deux opérations : t' en secondes.

Je pense que pour une machine donnée, le constructeur peut dire que la soudure de deux barres de diamètre d demandera une énergie j, la soudure durant un temps t.

A la séance de discussions du 24 octobre 1928 j'ai montré [1] comment j'arrivais à la relation entre la consommation et le diamètre des barres à souder :

$$P = 14{,}587 \frac{d^2 l}{t}$$

l étant reconnue expérimentalement égale à :

$$l = bd^{2\alpha}$$

b et α étant des constantes, variables avec la machine.

Je croyais donc que pour d donnée, on pouvait connaître j et, par

(1) Définition des machines à souder. *Bulletin de la Société française des Electriciens d'août 1928, pages 822 à 834.*

suite, la puissance P supposée constante durant le temps de l'opération :

$$P = 4{,}587\, b \frac{d^{(2\alpha+2)}}{t} = 6{,}13\, a \frac{S^{(\alpha+1)}}{t} \qquad (1)$$

S étant la section (a et b étant des constantes pour la machine).

J'avais cherché, à cette époque, une relation d'équivalence entre les régimes, c'est-à-dire les groupes de valeurs :

$$P,\ t \text{ et } n,$$

n étant le nombre d'opérations à l'heure.

Un raisonnement, trop simple, m'avait conduit à la relation :

$$P^2nt = \text{Constante}. \qquad (2)$$

J'ai rappelé ces formules dans mon rapport de l'année dernière. M. LANGUEPIN les a critiquées à la Réunion des Ingénieurs Soudeurs du 17 décembre 1931.

En ce qui concerne la première formule (1) on peut évidemment en tirer :

$$\frac{Pt}{S} = 6{,}13\, a\, S^{\alpha},$$

ce qui exprime que l'énergie dépensée par unité de section soudée est indépendante du temps : t.

M. LANGUEPIN a fait remarquer que cette énergie dépensée par unité de section variait avec la vitesse de soudure.

Nous avions établi ces formules d'après différents essais et le fait que les courbes, tracées sur quadrillé logarithmique, des consommations en fonction des sections, étaient des lignes droites, nous autorisait à poser :

$$I = aS^{\alpha} = bd^{2\alpha}$$

et par suite justifiait la formule (1).

Notre formule n'est cependant pas générale et M. LANGUEPIN a expliqué cette coïncidence mathématique entre les résultats publiés par différents constructeurs : Les constructeurs sont partis presque tous des mêmes puissances par unité de section soudée. J'avais donc simplement retrouvé le point de départ des constructeurs et je pense qu'il est bon de le signaler aujourd'hui.

Quant à la formule (2) :

$$P^2nt = \text{Constante}$$

M. LANGUEPIN l'a critiquée également et je suis entièrement de son avis ; d'ailleurs on peut essayer de faire mieux en développant les idées que j'exprimais dans mon rapport de 1928 au paragraphe :

« C. Conditions de possibilité d'un régime d'après les constantes thermiques de la machine. »

Nouvel essai de recherche des régimes équivalents dans la soudure par résistance.

Le point de départ commun et la copie mutuelle pratiquée par les constructeurs font qu'il ne nous est pas possible d'établir d'après les résultats publiés, une formule générale de la consommation d'énergie nécessaire pour une soudure donnée.

Nous espérons que les constructeurs ne cacheront pas longtemps

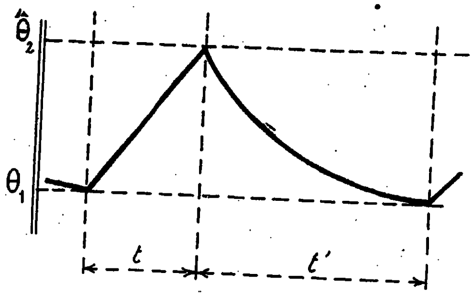


Fig. 1.

leurs résultats et qu'un jour le problème pourra être traité plus complètement.

Malgré tout il existe une relation, il faudra la trouver. On peut admettre qu'une opération de soudure est équivalente, au point de vue de l'échauffement du transformateur de soudure, à un régime de fonctionnement à P kW pendant t secondes.

La puissance P kW correspond, pour un transformateur de machine à souder, à une intensité efficace déterminée et à une densité de courant :

$$\delta \text{ ampères par mm}^2.$$

dans l'enroulement primaire.

Un régime de soudure peut donc être assimilé à une série de cycles tels que :

1° Echauffement du transformateur fonctionnant t secondes avec une densité de courant δ ampères par millimètre carré dans le primaire.

2° Refroidissement pendant t' secondes.

Ce cycle est représenté par la figure 1.

Dans la première partie, la température du transformateur passe de θ_1 à θ_2 et dans la seconde de θ_2 à θ_1.

Les densités de courant δ, étant relativement grandes dans le primaire d'un transformateur de machine à souder par résistance, on peut admettre que la perte Joule est uniquement employée à échauffer la masse du conducteur, comme on le fait dans la vérification des échauffements des bobinages des auto-transformateurs de démarrage.

On a :

$$\theta_2 - \theta_1 = \frac{\delta^2 t}{162{,}5} \qquad (3)$$

pour les bobinages en cuivre.

La période de refroidissement dure t' et l'expérience montre que l'on a :

$$t' = \mathrm{K} \log_{10} \frac{\theta_2}{\theta_1} \qquad (4)$$

K étant une constante dépendant de la machine.

Le nombre de soudures possible à l'heure est :

$$n = \frac{3\,600}{t + t'}. \qquad (5)$$

On peut chercher à rendre plus applicables ces différentes formules.

On a :

$$\delta = \frac{\mathrm{I}}{s}$$

s = section du cuivre en millimètres carrés.

et

$$\mathrm{I} = \frac{j}{\mathrm{U}t \cos \varphi}$$

j étant la consommation en joules.

U, la tension primaire en V.

Cos φ, le facteur de puissance de la machine.

Reportant dans la formule (3) on a :

$$t = \frac{j^2}{162{,}5\, s^2 \mathrm{U}^2 (\theta_2 - \theta_1) \cos^2 \varphi}.$$

Pour une machine donnée le produit :

$$162{,}5\; s^2 \mathrm{U}^2 \cos^2 \varphi$$

est une constante A.

Ceci n'est pas tout à fait rigoureux puisque le facteur de puissance n'est pas constant, mais on peut l'admettre constant lorsqu'il s'agit de comparer des opérations de même genre.

On a donc :

$$t = \frac{j^2}{A(\theta_2 - \theta_1)} . \tag{6}$$

La durée d'un cycle est donc :

$$t + t' = \frac{j^2}{A(\theta_2 - \theta_1)} + K \log_{10} \frac{\theta_2}{\theta_1} . \tag{7}$$

Cette formule (7) n'est pas encore très pratique.

θ_2 peut être considérée comme une constante, c'est, en effet, un maximum de température qu'il ne faut pas dépasser.

On peut prendre comme variable auxiliaire

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 .$$

On a : d'après (6)

$$\Delta\theta = \frac{j^2}{At}$$

et d'après les lois du refroidissement :

$$\Delta\theta = \theta_2\left(1 - 10^{\frac{-t'}{K}}\right)$$

d'où :

$$\frac{j^2}{At} = \theta_2\left(1 - 10^{\frac{-t'}{K}}\right) \tag{8}$$

ou :

$$\frac{j^2 t}{A\theta_2} = 1 - 10^{\frac{-t'}{K}}$$

ou :

$$\frac{j^2 t}{B} = 1 - 10^{\frac{-t'}{K}} \tag{9}$$

B étant une constante de la machine.

La relation :

$$\frac{j^2 t}{B} = 1 - 10^{\frac{t'}{K}} \tag{9}$$

doit permettre de trouver les régimes possibles avec une machine donnée. Il suffit de connaître deux régimes de la machine pour déterminer les constantes B et K.

Je serais très heureux que les constructeurs qui ont fait des essais rationnels me disent simplement si la relation (9) se trouve justifiée par leurs résultats.

En regrettant fort à ce sujet que les constructeurs « ne tiennent pas à communiquer les résultats » comme l'a déclaré M. LANGUEPIN

à la Réunion des Ingénieurs Soudeurs du 17 décembre 1931, j'espère cependant qu'ils voudront bien répondre au moins par oui ou par non.

Conclusions.

Dans ce qui précède j'ai montré mon point de vue personnel d'envisager ces problèmes.

Les difficultés sont bien visibles et on s'aperçoit que la plus grande est le manque de documentation sérieuse. Il est dommage que les constructeurs soient si peu disposés à communiquer le moindre résultat.

Je n'ai effleuré qu'une petite partie du problème posé et je sais que le reste est aussi difficile.

En faisant un appel aux constructeurs et à la collaboration de tous j'espère qu'il en résultera quelque chose de rationnel, d'utile, c'est-à-dire un véritable progrès.

SUR LES GÉNÉRATRICES ET TRANSFORMATEURS POUR SOUDURE A L'ARC (1)

par M. M. Moneyron,

Ingénieur E. S. E.,
Directeur des Etablissements Sarazin.

La présente note a pour objet de résumer les différentes caractéristiques électriques des génératrices et transformateurs de courant pour soudure à l'arc, en vue de contribuer à leur définition technique.

A. — Génératrices de soudure.

Les génératrices de soudure sont actuellement divisées en deux classes :

1° Les génératrices à tension constante, dont la valeur du courant de soudure est déterminée et réglée par des résistances placées en série sur le circuit de débit.

Ces génératrices sont utilisées dans le cas d'alimentation de postes de soudure multiple.

2° Les génératrices à tension variable, dont la valeur du courant de soudure est limitée et réglée par la génératrice elle-même, au moyen d'enroulements compound inversés ou tous autres dispositifs internes.

La description de ces deux types de génératrice sortirait du cadre de cette note, et nous n'en avons parlé que pour indiquer la similitude de leurs caractéristiques externes.

Caractéristiques externes.

On définit, en général, par caractéristique externe d'une génératrice, la courbe relevée en *régime établi* de la tension aux bornes de celle-ci en fonction du courant débité. Or, la soudure à l'arc entraîne, pour la génératrice qui fournit le courant, un régime essentiellement variable et il est intéressant de connaître *à tout instant* la valeur du courant débité.

(1) Ce rapport sera présenté à la Semaine de discussions de novembre 1932.

Nous avons donné aux caractéristiques externes habituelles le nom de caractéristiques statiques, et à celles du régime variable le nom de caractéristiques dynamiques.

Caractéristiques statiques.

La caractéristique statique d'une génératrice de soudure est une courbe plongeante du type I ou II, en portant en ordonnées la tension aux bornes et en abscisses le courant.

Les courbes du type I sont généralement appelées caractéristiques à puissance constante. Entre les points A et B de fonctionnement de

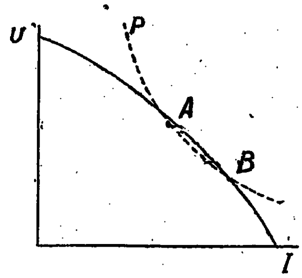


Fig. 1. — Caractéristique statique du type I.

la génératrice, la courbe I se rapproche en effet de l'hyperbole équilatère $P = UI = Cte$, la puissance et la chaleur utilisées dans l'arc sont donc constantes, et il semble ainsi à première vue que la courbe I

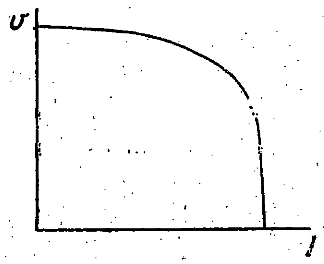


Fig. 2. — Caractéristique statique du type II.

est la plus intéressante pour la soudure. Avec cette caractéristique le courant de court-circuit est limité à une valeur maximum qui varie entre 1, 3 et 2 fois le courant de soudure (fig. 1).

Les courbes II sont appelées caractéristiques à courant constant. Dans ce cas, la puissance aux bornes de l'arc croît avec sa tension et sa longueur. Cette caractéristique semble intéressante pour le maintien de l'arc à une longueur assez grande, puisque les pertes par

rayonnement et autres sont sensiblement compensées au fur et à mesure de l'allongement de l'arc (fig.2).

Les courbes du type II donnent au soudeur plus de facilité pour son travail. En réalité, elles ne l'obligent pas à tenir un arc court, condition indispensable pour faire une bonne soudure.

En résumé, les courbes I et II donnent des résultats semblables avec un bon soudeur, les courbes I étant meilleures dans le cas d'un mauvais soudeur.

Caractéristiques dynamiques.

Les caractéristiques dynamiques sont beaucoup plus importantes que les caractéristiques statiques au point de vue soudure à l'arc, car elles donnent la valeur exacte du courant en fonction de la tension de l'arc pendant la soudure et à tout moment. Ces caractéristiques ne

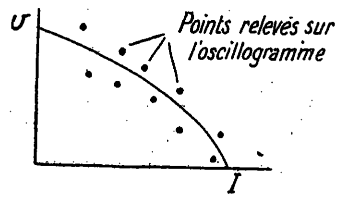


Fig. 3.

peuvent être relevées qu'au moyen d'un oscillographe de Blondel et donnent le degré d'instantanéité de la génératrice.

Une machine de soudure parfaite serait celle où les points correspondants de tension et de courant relevés sur un oscillogramme, se placeraient sur la caractéristique statique de la génératrice.

L'instantanéité de la machine serait d'autant meilleure que les points relevés sur un oscillogramme seraient moins dispersés, par rapport à la caractéristique statique (fig. 3).

Deux points supplémentaires très importants à relever sur l'oscillogramme sont :

— la valeur du courant de court-circuit au moment de l'amorçage de l'arc et

— le temps de réamorçage de la machine après un court-circuit prolongé ou non.

Puissance des génératrices de soudure.

La tension aux bornes d'un arc de soudure varie généralement, suivant le type d'électrode employé, entre 15 et 23 V.

Il y a souvent lieu d'ajouter à cette tension quelques volts pour tenir compte des câbles de soudure assez longs, et l'on a adopté jusqu'à ce jour, pour définir la puissance d'une génératrice de soudure, le régime en ampères correspondant à 25 V aux bornes de la génératrice.

En raison du fonctionnement de la génératrice qui peut être, soit continu pour l'alimentation de machines automatiques, soit discontinu pour la soudure manuelle, il semble intéressant de préciser le régime en ampères sous 25 V pour différents coefficients d'utilisation, par exemple :

X	Ampères	sous 25 V	— Utilisation	100	pour 100	du temps.
Y	»	»	»	70	»	
Z	»	»	»	40	»	

Rendement des génératrices de soudure.

Pour l'évaluation du rendement, il semble naturel de prendre, comme pour la définition de la puissance, une tension de 25 V aux bornes de la génératrice.

Le rendement serait ainsi défini, comme il est d'usage, par le rapport de l'énergie fournie à la génératrice dans le cas d'une génératrice seule, ou au moteur entraînant la génératrice dans le cas d'un groupe, à l'énergie débitée par la génératrice, pour un fonctionnement avec 25 V aux bornes de celle-ci.

Isolement des génératrices

L'U. S. E. indique des conditions générales de réception de l'isolement suivant que la tension est plus grande ou plus petite que 25 V. Dans le premier cas, la tension d'essai est de $2U + 1\,000$ V et dans le deuxième cas, de $2U + 500$ V.

Dans le cas d'une génératrice de soudure, doit-on adopter pour la tension d'essai, la valeur de $2U + 500$ V, puisque le fonctionnement se fait à 25 V ?

A notre avis, il est préférable de prendre : $2U + 1\,000$ V. Les génératrices de soudure sont en effet, en général, dans des ateliers poussiéreux, et souvent dans des endroits humides, l'isolement demande donc à être soigné en dépit de leur faible tension d'utilisation.

B. — Transformateurs a courant alternatif

La soudure en courant alternatif utilise actuellement, soit des transformateurs monophasés-monophasés, soit des transformateurs polymonophasés.

a) *Transformateurs monophasés-monophasés*

Ces appareils sont actuellement divisés en trois classes :

1° *Les transformateurs à tension constante* dont le courant de soudure est réglé par des résistances placées dans le circuit de débit.

2° *Les transformateurs à tension constante* dont le courant est réglé par des inductances placées dans le circuit de débit.

3° *Les transformateurs à tension variable* dont la valeur du courant de soudure est limitée, par le transformateur lui-même, au moyen d'un shunt magnétique placé entre les bobines primaire et secondaire.

Les caractéristiques statiques de ces appareils sont du type I ou II définis au paragraphe des génératrices.

De même que pour les génératrices de soudure, les courbes à puissance constante et à intensité constante donnent, au point de vue qualité des soudures, des résultats équivalents.

Les transformateurs de la classe I sont cependant de moins en moins employés à cause de la plus grande difficulté que l'on rencontre pour amorcer l'arc avec ceux-ci.

Puissance des transformateurs de soudure. — Au paragraphe des génératrices de soudure, il est adopté une tension de 25 V aux bornes de l'arc et nous proposons d'indiquer la puissance des transformateurs de la même façon que pour les génératrices de soudure, c'est-à-dire en définissant le régime en ampères correspondant à 25 V pour les différents coefficients d'utilisation de 100, 70, 40 pour cent.

Rendement des transformateurs. — Le rendement des transformateurs sera évalué de la même façon que pour les génératrices de soudure, en prenant le fonctionnement correspondant à 25 V aux bornes du transformateur.

Facteur de puissance. — La question du facteur de puissance dans les transformateurs monophasés est beaucoup plus importante que dans les groupes à courant continu. En effet, dans ces derniers, le

cosinus φ de l'installation correspond au cosinus φ normal d'un moteur en charge, tandis que dans les transformateurs des classes 2° et 3°, le facteur de puissance est beaucoup plus faible et *est directement proportionnel à la tension à vide secondaire* du transformateur. Il importe donc, à notre avis, de spécifier, en même temps que le cosinus φ primaire du transformateur, la tension à vide secondaire de celui-ci.

S'il était possible de réduire cette tension à vide à une valeur très faible, il y aurait intérêt à le faire pour améliorer le cosinus φ, cependant on est limité dans cet abaissement de la tension par la difficulté d'amorçage de certaines électrodes à faible tension.

Isolement des transformateurs. — Les conditions de l'U. S. E. sont applicables à l'isolement du transformateur et ceux-ci doivent être essayés à la tension 2U + 1 000.

b) *Transformateurs poly-monophasés.*

Les transformateurs polyphasés-monophasés sont actuellement de deux types.

1° Les transformateurs statiques poly-monophasés réalisant leur équilibrage primaire par l'intermédiaire de résistances et d'inductances.

2° Les transformateurs réalisant la transformation de la tension primaire en tension secondaire, statiquement, comme dans un transformateur ordinaire.

L'équilibrage du courant est réalisé sur les différentes phases, dynamiquement, au moyen d'un rotor bobiné.

Caractéristiques externes. — Les caractéristiques externes sont du type 1 et 2 définies au paragraphe des génératrices de soudure.

Puissance et rendement des transformateurs. — La puissance et le rendement des transformateurs seraient définis comme pour lès transformateurs monophasés.

Isolement des transformateurs. — Cet isolement devrait être conforme aux conditions générales de l'U. S. E.

Equilibrage des phases. — Dans le cas du transformateur poly-monophasé, il y a lieu d'indiquer l'équilibrage réalisé sur les différentes phases primaires

Cet équilibrage serait défini en pour 100 ; nous proposons ci-après un exemple de calcul de l'équilibrage d'un transformateur poly-monophasé.

	Ampères
Phase 1	45
Phase 2	40
Phase 3	50

Le courant moyen serait de 45 A et la phase la plus défavorable au point de vue équilibrage donne une différence de 5 A, soit un pourcentage de déséquilibrage égal à $\frac{5}{45} = 11$ pour 100.

Facteur de puissance. — Comme dans les transformateurs monophasés, le facteur de puissance devrait être défini en fonction de la tension à vide secondaire du transformateur.

APPAREILS DE PRISE DE COURANT UTILISÉS EN FRANCE SUR LES LIGNES DE TRACTION A COURANT CONTINU 1500 V [1]

par M. Cande

Inspecteur divisionnaire au Chemin de fer d'Orléans.

Sommaire

Classification des appareils. — Construction des appareils. — Réglage et conditions de fonctionnement. — Résultats obtenus en service.

Les pantographes à courant continu sont assez différents dans leur construction de ceux employés dans les autres systèmes de traction; cela tient surtout à l'importance des courants à capter qui sont très supérieurs à ceux rencontrés en traction monophasée, par exemple, où la tension d'alimentation atteint 10 à 15000 V.

I. — Classification des appareils.

Dans tous les pantographes qui nous occupent et dont un spécimen est représenté par la photographie fig. 1, on retrouve les mêmes éléments principaux à savoir :

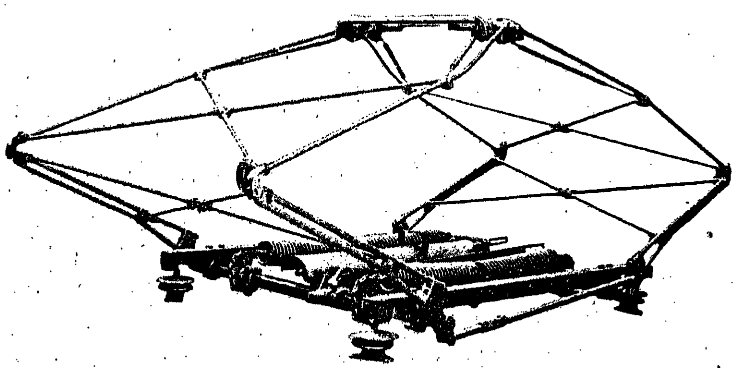


Fig. 1.

Un archet à simple ou double semelle de contact, monté élastique-

(1) Ce rapport sera discuté au cours de la semaine de discussions de novembre 1932.

ment sur les bras de l'appareil et auquel sont fixées les barres de cuivre qui assurent le contact permanent avec la ligne.

Des bras articulés permettant à l'archet de suivre toutes les variations de hauteur de la ligne.

Un bâti, fixé au toit de la machine et supporté par 4 isolateurs, qui porte les arbres de commande sur lesquels sont attachés les bras ainsi que les organes moteurs, ressorts et cylindres à air comprimé.

Tous ces appareils diffèrent assez sensiblement dans les détails d'exécution et, pour plus de clarté, on peut les grouper suivant leur mode de commande et suivant la forme de leurs archets.

A. — Mode de commande.

La pression de contact des archets sur le fil est donnée dans tous les cas par de forts ressorts dont l'entrée en action est commandée à distance, toutefois les conditions dans lesquelles ces ressorts agissent sont différentes et on peut distinguer entre les pantographes qui s'élèvent sous l'action de l'air comprimé et ceux qui ne font intervenir que des ressorts.

a) *Pantographes élevés par l'air comprimé.*

Nous rangerons sous cette désignation les appareils dans lesquels l'action de l'air comprimé est indispensable pour faire élever l'appareil, cette action s'exerçant d'ailleurs de deux façons différentes.

1° *Pantographes dans lesquels l'air comprimé augmente la tension des ressorts élévateurs.* — Dans les appareils de ce type :

pantographes de la Société d'Etudes. — Compagnie d'Orléans,
— Faiveley sans cornes. — Compagnies P.L.M. et d'Orléans.
— de la Société Alsacienne. — Compagnie P.L.M.,

les ressorts principaux ou élévateurs sont attachés, d'une part aux deux arbres de commande des bras et d'autre part aux pistons des cylindres à air comprimé, mais leur tension au repos est insuffisante pour provoquer le développement du pantographe.

Lorsqu'on veut élever l'appareil, on envoie de l'air comprimé dans les cylindres et le déplacement des pistons augmente suffisamment la tension des ressorts élévateurs pour provoquer la montée du pantographe.

Lorsqu'il s'agit, au contraire, d'abaisser le pantographe, on évacue

l'air comprimé des cylindres ce qui provoque le retour en arrière des pistons sous l'action des ressorts et l'appareil retombe sous la seule action de la pesanteur.

Dans les pantographes de la Société d'Etudes et Faiveley sans cornes, les pistons n'agissent en réalité que sur la moitié des ressorts élévateurs, car les autres ressorts dits « équilibreurs » sont attachés directement au bâti au lieu d'être solidaires des pistons. Ces derniers ressorts, dont la bande augmente lorsque l'appareil s'abaisse, équilibrent une partie du poids de la partie mobile du pantographe et jouent ainsi, mais d'une manière assez peu efficace, le rôle d'amortisseurs.

2° *Pantographes dans lesquels l'air comprimé agit sur un ressort antagoniste des ressorts élévateurs.* — Dans cette disposition, que l'on rencontre dans les pantographes Oerlikon avec et sans cornes, de la Compagnie d'Orléans, les ressorts élévateurs sont attachés par leurs extrémités à chacun des 2 arbres de commande et bandés au maximum lorsque l'appareil est replié. Par ailleurs, leur action est contrebalancée par un ressort placé dans le cylindre à air en arrière du piston dont la tige est reliée à l'un des arbres de commande suivant la disposition représentée à la fig. 15. Tant que le cylindre est vide, le ressort antagoniste annule l'action des ressorts élévateurs et l'appareil reste replié, par contre, si l'on introduit l'air comprimé dans le cylindre, le piston se déplace en écrasant le ressort antagoniste et le mouvement de l'arbre n'étant plus contrarié, l'appareil s'élève sous l'action des ressorts élévateurs.

Pour replier le pantographe, on fait évacuer l'air comprimé, le ressort antagoniste ramène alors le piston vers le fonds de cylindre en faisant tourner les arbres de commande et le pantographe se replie. Le détail du fonctionnement de ce dispositif sera indiqué au paragraphe amortissement.

b) *Pantographe levé par ressorts.*

Dans cet appareil au contraire, tous les ressorts qui sont attachés d'une part au bâti et d'autre part aux arbres de commande jouent, comme on le voit, le même rôle et sont bandés au maximum lorsque le pantographe est replié. Les pistons des cylindres à air comprimé agissent à la descente sur les arbres de commande de telle sorte que leur action sur ces arbres est inverse de celle des ressorts élévateurs.

Si donc l'appareil est replié et verrouillé, il suffit de libérer ce verrou pour que le pantographe s'élève sous l'action des ressorts.

Pour l'abaisser on envoie alors l'air comprimé dans les cylindres et les pistons en se déplaçant neutralisent l'action des ressorts et provoquent le repli de l'appareil qui se verrouille automatiquement en fin de course. On évacue alors l'air comprimé des cylindres.

B. — Profil des archets

Les archets sont constitués par un support en tôle d'acier qui porte des barres de frottement amovibles en cuivre. Ils se composent d'une partie rectiligne, d'une longueur d'environ 1 mètre qui est suffisante pour absorber, aussi bien le désaxement en alignement donné de construction à la ligne pour répartir l'usure des barres sur une grande partie de leur longueur, que le désaxement en courbe qui est lui-même fonction de l'écartement des supports de la ligne. Afin d'éviter que les extrémités de la partie rectiligne de l'archet ne viennent accrocher des lignes voisines, on la prolonge par des organes d'abordage inclinés et raccordés à la partie droite par des arrondis.

a) *Pantographe à cornes* (fig. 2).

Dans cet appareil, les organes d'abordage ou « cornes » font partie

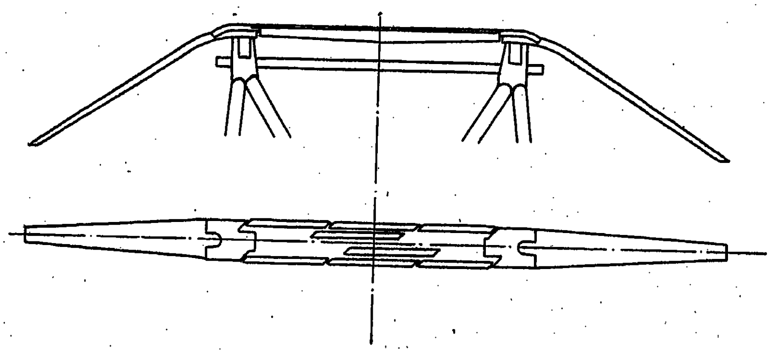


Fig. 2.

de l'archet lui-même et sont assemblés avec la partie médiane rectiligne soit directement, soit par l'intermédiaire de pièces généralement en aluminium fondu.

b) *Pantographe sans cornes* (fig. 3)

L'archet comprend une partie rectiligne terminée à ses deux extrémités par un court arrondi qui se raccorde avec la partie supérieure des bras convenablement repliée et recouverte de pièces de frottement

en cuivre visibles sur la fig. 3. Ce type de pantographe a été établi en vue de supprimer tout risque d'accrochage de la ligne.

Comparés aux appareils à cornes, les pantographes sans cornes ont un bâti plus large, ce qui augmente leur encombrement et rend parfois difficile leur installation sur le toit des locomotives, de plus l'assem-

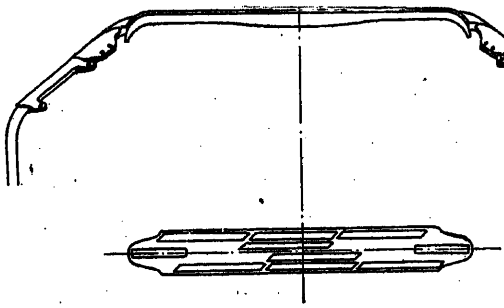


Fig. 3.

blage des tubes à la partie supérieure des bras est assez délicat par suite de la nécessité d'obtenir un raccordement correct de l'archet avec les bras pour les différentes hauteurs de développement de l'appareil.

II. — Construction des appareils.

Nous allons indiquer ci-après les particularités de construction des appareils utilisés en France :

— Pantographe à cornes de la Société d'études,	Cie d'Orléans.
— — — Faiveley	Cie du Midi.
— — sans cornes —	Cie du P.L.M. et d'Orléans.
— Pantographes à cornes Oerlikon	Cie d'Orléans,
— sans cornes —	Cie d'Orléans,
— à cornes Société A.C.M.	Cie du P.L.M. (1 locomotive),

en examinant successivement les archets, les montages des archets, les bras et les châssis.

A. — Archets

Les archets sont en tôle d'acier emboutie dont l'épaisseur varie de 1,5 à 2,5 mm. Lorsqu'ils comportent des cornes, celles-ci sont, soit simplement constituées par les extrémités de l'archet convenablement recourbées (Faiveley), soit rapportées et assemblées par boulons

(Oerlikon) ou enfin rapportées et assemblées par une pièce intermédiaire moulée (Société d'Études et Société A.C.M.).

Les barres de frottement sont en cuivre à section rectangulaire avec les angles supérieurs arrondis, leur épaisseur varie de 4 à 8 mm et leur largeur de 16 à 30 mm suivant les appareils. Elles sont disposées de façon qu'il y ait un plus grand nombre de barres au milieu que dans les bouts, généralement on dispose 4 barres dans la partie médiane et 2 aux extrémités.

Les extrémités des barres sont taillées en biseau et les joints entre barres sont décalés comme cela est visible sur les fig. 2 et 3 pour éviter de créer des zones de moindre résistance.

La Compagnie d'Orléans a adopté pour ses différents types de pantographes une barre unique qui a 7 × 25 mm de section, ces barres sont fixées à la semelle par des boulons en laiton à tête cylindro conique qui remplissent entièrement le trou fraisé des barres et que l'on peut à l'occasion retourner bout pour bout lorsqu'une extrémité est plus usée que l'autre afin d'en augmenter la durée.

B. — Montage des archets

La plupart des pantographes utilisés en France comportent généralement deux archets. Toutefois on a construit dans ces dernières années des appareils à un seul archet. Ces archets, qui doivent avoir une faible inertie, sont montés d'une manière élastique par rapport à l'axe de

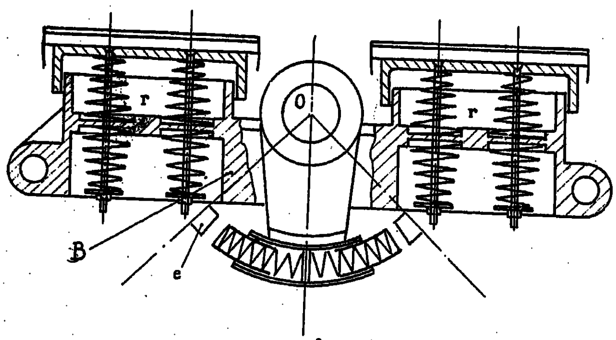


Fig. 4.

tête du pantographe et c'est cette élasticité de l'archet qui lui permet de suivre en vitesse les ondulations de la voie que le pantographe réduit aux ressorts principaux serait incapable d'absorber en raison de l'inertie de la partie mobile et des frottements dans les axes.

Nous allons examiner successivement les différents modes de suspension des archets des appareils qui nous occupent.

1° *Pantographes Faiveley* (fig. 4). — Ces pantographes, qu'ils soient à cornes ou sans cornes, comportent deux archets dont chacun est monté par l'intermédiaire de boîtes à ressorts *r* à l'extrémité d'un balancier B qui tourne autour de l'axe de tête O. Les 2 balanciers B, qui sont mobiles autour de l'axe, sont reliés entre eux par deux barres de façon à constituer un support indéformable. Les archets sont simplement assemblés aux boîtes à ressort par deux verrous à ressort ce qui rend leur remplacement extrêmement rapide. L'inclinaison des archets est limitée par des pièces de rappel constituées par un système élastique fixé au balancier et qui vient s'appuyer contre l'une des butées *e* lorsque la tête du pantographe s'incline.

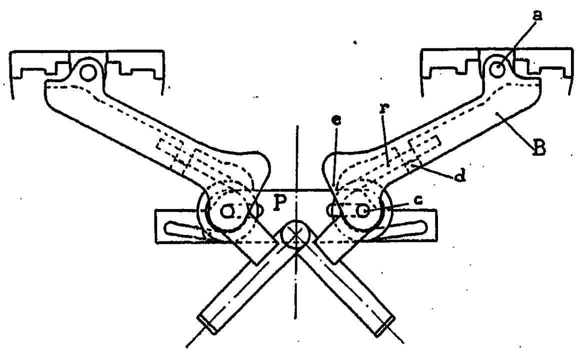


Fig. 5.

2° *Pantographe de la Société d'Etudes* (fig. 5). — Ce pantographe à cornes est également à deux archets. Chaque archet porte à chacune de ses extrémités un axe *a* monté sur un bras B pivotant autour d'un axe C, un ressort *r* rappelle constamment le bras vers le haut. Une particularité intéressante de ce montage réside dans le fait que les 2 axes *c* des archets sont montés sur une pièce P fixée au bras de l'appareil de telle manière qu'elle se déplace toujours parallèlement à elle-même en restant d'ailleurs horizontale. Cette disposition assure une indépendance complète aux deux archets. Les butées *d* et *e* limitent, lorsqu'elles viennent en contact avec la pièce P la course des bras B vers le bas et vers le haut.

3° *Pantographes Oerlikon.* — Ces pantographes sont de deux modèles, à cornes et sans cornes.

Pantographe à cornes. — Nous ne citerons ici que pour mémoire le

montage représenté fig. 6 qui était employé pour ce pantographe à 2 archets, puisque cette disposition a été abandonnée et que tous les appareils de cette série ont été transformés en pantographes à un seul archet dont le montage sera décrit au § 5e ci-après.

L'ancien montage se comprend suffisamment à l'examen de la fig. 6; sans qu'il soit nécessaire de le décrire, nous signalerons toutefois que

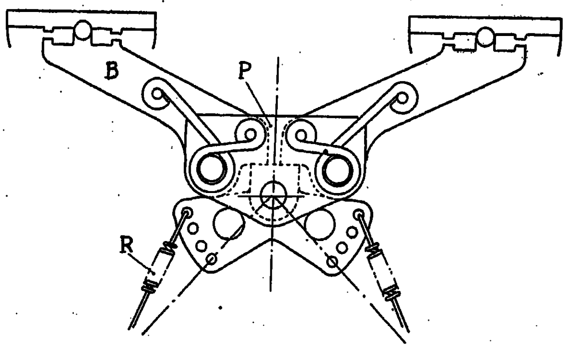


Fig. 6.

les inconvénients entraînés par ce dispositif provenaient de ce que sous l'action de la pression de l'air et des frottements, il se produisait dans certains cas une différence de poussée suffisante entre les 2 archets pour

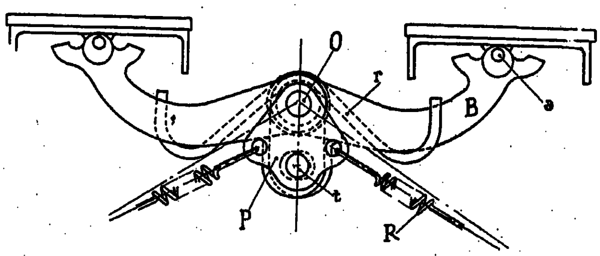


Fig. 7.

faire quitter le contact au deuxième dans le sens de marche. On remarque, en effet, que tout mouvement de renversement du 1er archet avait pour cons'quence de faire basculer la pièce P et d'entraîner dans son mouvement le bras B du 2e archet, car l'action des ressorts de rappel R était insuffisante en raison du faible couple et du poids élevé de la tête, 40 kg environ, pour rétablir les archets dans leur position horizontale.

Pantographe sans cornes (fig. 7). — Ce pantographe comporte 2 archets qui pivotent à leurs extrémités sur un axe *a* monté sur un levier à chape B oscillant autour de l'axe de tête O. Les 2 leviers voi-

sins sont soulevés par un ressort unique r enroulé au'our de l'axe O et dont les extrémités libres soulèvent par en-dessous les leviers B. L'orientation fixe des leviers B est assurée par une pièce P à laquelle sont attachés les ressorts de rappel R et qui porte une tige t qui traverse deux trous ovalisés pratiqués dans les leviers, ce qui limite leur déplacement aussi bien vers le bas que vers le haut.

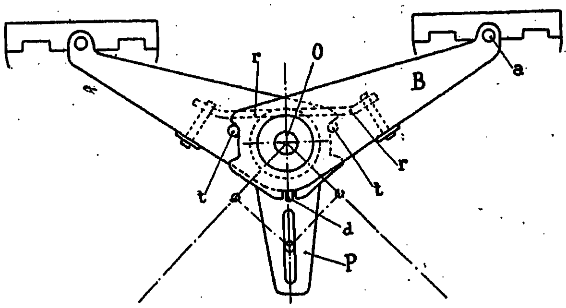


Fig. 8.

4° *Pantographe de la Société Alsacienne de Constructions Mécaniques* (fig. 8.) — Le montage des deux archets de ce pantographe est en principe le même que celui du précédent. Les archets pivotent sur 2 axes a portés par les bras B qui tournent eux-mêmes sur l'axe de tête O. Ces bras sont également rappelés vers le haut par un ressort unique r.

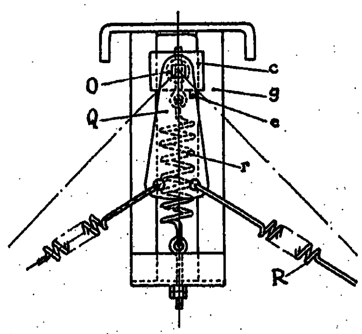


Fig. 9.

La position des archets est fixée par la butée d fixée à une pièce P qui est constamment tenue sur la verticale par un système articulé relié aux bras du pantographe et leurs déplacements vers le haut et vers le bas sont limités par l'action des tiges t portées par chaque bras et qui se déplacent dans une encoche de l'autre.

5° *Pantographe à un seul archet de la Société Oerlikon* (fig. 9). — Ce pan-

tographe à cornes n'est autre que le pantographe à 2 archets mentionné au § 3 dont la tête a été modifiée. L'archet est monté sur 2 supports constitués chacun par 2 glissières *g* entretoisées en haut et en bas entre lesquelles coulisse une pièce *c* goupillée sur l'axe de tête O. Un ressort *r* dont la tension est réglable rappelle l'archet vers le haut et celui-ci est maintenu dans la position verticale par l'action des ressorts de rappel R attachés à la pièce Q fixée à l'axe O. L'archet peut se déplacer vers le haut jusqu'à ce que la butée *e* vienne au contact avec le dessous du coulisseau et vers le bas jusqu'à ce que la partie supérieure du coulisseau butte contre la semelle de l'archet.

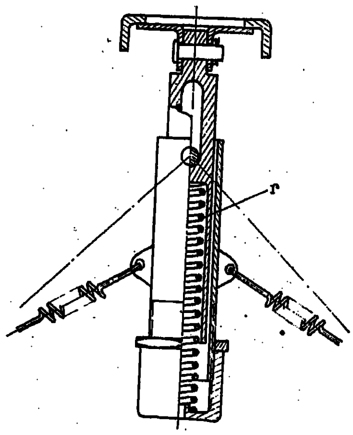


Fig. 10

Cette disposition a été améliorée mécaniquement sur quelques appareils d'essai comme l'indique la fig. 10 dans laquelle la course du ressort *r* a été encore sensiblement augmentée.

C. — Bras

La tête des pantographes, comprenant les archets et leurs pièces de montage, est supportée par des bras articulés fixés au châssis et qui doivent avoir un développement tel que les archets restent constamment en contact avec la ligne dont la hauteur au-dessus du plan des rails peut varier de 4,435 m (cas du tunnel de Paris-Austerlitz à Paris Quai d'Orsay) à 6,500 m.

Les bras se composent de 4 croisillons assemblés 2 à 2 ; les croisillons inférieurs sont clavetés sur les 2 arbres de commande et les croisillons supérieurs supportent l'axe de tête du pantographe. Ils sont constitués par des tubes en acier de 30 à 35 mm de diamètre extérieur entretoisés,

soit par des tubes, soit par des cordes à piano avec tendeurs. Les différents tubes sont assemblés par des pièces en acier moulé auxquelles ils sont fixés par rivets, boulons ou par colliers de serrage, ce dernier mode de fixation utilisé par la Société Oerlikon est intéressant car il facilite le réglage de la longueur des tubes.

Il y a d'autre part un intérêt évident à diminuer les frottements dans les articulations qui sont nombreuses, aussi fait-on un large usage dans la plupart des pantographes de roulements à billes simples ou à rotule, ce qui est préférable à l'emploi des articulations lisses.

Le courant capté doit traverser tous les tubes pour arriver aux câbles d'amenée de courant fixés au châssis, aussi comme ce courant est généralement élevé, évite-t-on de le faire passer par les articulations en shuntant ces dernières par des conducteurs en tresse de cuivre souple. Dans les pantographes Faiveley, on emploie au lieu de la tresse, des pièces spéciales en cuivre formant ressort enfilées sur les axes à l'intérieur des articulations qui s'appliquent avec pression sur les parties mobiles en présence.

D. — Chassis et mécanisme de commande

Les châssis sont constitués par des fers à U ou cornières assemblés par des entretoises et qui supportent les organes moteurs, ressorts et cylindres à air comprimé et les 2 arbres principaux auxquels sont attachés les bras.

Les dispositions des organes moteurs diffèrent dans les détails d'un appareil à l'autre, mais nous nous bornerons à mentionner les dispositions particulières qui paraissent intéressantes à noter.

Tous les appareils sont munis de 2 biellettes de conjugaison, dont une est visible fig. 1, placées de part et d'autre du châssis et dont les extrémités sont attachées sur des manivelles calées sur les arbres de commande. Ces biellettes ont pour but d'assurer la montée verticale du pantographe même, si les couples sont inégaux sur les deux arbres.

Les pantographes de la Société d'Etudes comportent 2 ressorts équilibreurs et 2 ressorts élévateurs, chacun de ces derniers étant commandé par un cylindre à air.

Les pantographes Faiveley sans cornes comportent un jeu de 4 ressorts équilibreurs réunis 2 par 2 et un jeu de 4 ressorts élévateurs réunis également 2 par 2, par l'intermédiaire d'un palonnier qui est relié à chacune des tiges de piston des 2 cylindres.

Les pantographes de la Société Alsacienne ont 4 ressorts élévateurs réunis par 2 sur 2 palonniers qui sont reliés chacun à la tige de piston des 2 cylindres correspondants.

Les pantographes Oerlikon sans cornes et à cornes comportent 2 ou 4 ressorts élévateurs et un cylindre à air unique contenant le ressort antagoniste.

Les pantographes Faiveley avec cornes de la Compagnie du Midi à élévation par ressorts ont 4 ressorts élévateurs et 2 cylindres à air avec un ressort de rappel placé à l'intérieur de chaque cylindre. Dans ces appareils, les pistons ne sont pas reliés rigidement à leurs tiges, de sorte que lorsque l'appareil est en contact avec la ligne, la rotation des arbres de commande qui se produit aux changements de hauteur n'entraîne pas les pistons.

III. — Réglage et conditions de fonctionnement.

a) *Pression des pantographes sur le fil de contact.*

La pression sur le fil de contact est représentée par la poussée verticale du pantographe déployé, mesurée sur l'axe de tête de l'appareil.

Sur un appareil déployé à l'arrêt, cette pression varie suivant que l'archet s'élève ou s'abaisse, cela résulte de ce que le couple dû aux frottements dans les articulations s'ajoute au couple élévateur lorsque l'appareil descend et s'en retranche lorsqu'au contraire il s'élève. Il en résulte que pour une même altitude de l'archet, on peut lire sur le dynamomètre 2 valeurs de la poussée suivant que l'appareil monte ou descend. Si au cours de son développement on l'arrête, la pression mesurée au dynamomètre est alors intermédiaire entre les 2 pressions que l'on mesurerait à la même altitude en montant ou en descendant. Mais si on soumet l'appareil arrêté à des vibrations, on fait disparaître en grande partie l'influence des frottements et la pression mesurée dans ces conditions est sensiblement égale à la moyenne entre les 2 pressions.

Lorsqu'il s'agit de reprendre complètement le réglage d'un pantographe, ou de relever les courbes de pression à la montée et à la descente, on utilise dans les Ateliers de la Compagnie d'Orléans un dynamomètre qui est attaché par un fil vertical, d'une part à l'axe de tête et d'autre part à un tambour que l'on entraîne par un petit moteur électrique pour que la vitesse de déroulement soit rigoureusement cons-

tante. L'appareil étant réglé, si on a besoin de faire une vérification dans les dépôts, on mesure la poussée moyenne à des altitudes bien déterminées pour chaque type d'appareils en soumettant le pantographe à des vibrations.

Les écarts de pression à la montée et à la descente sont assez différents d'un appareil à un autre suivant l'importance des frottements. Toutefois, ces écarts pour un même appareil ne varient presque pas avec l'altitude de l'archet, de sorte que les 2 courbes restent sensiblement parallèles. A titre d'indication, ces écarts varient d'un type de pantographe à un autre de 2 kg à 5,5 kg pour des appareils non soumis à vibrations et en bon état d'entretien courant. La figure 17 donne la courbe de réglage d'un appareil Oerlikon.

En ce qui concerne la valeur de la pression de réglage à donner aux appareils, on peut dire que, pour chaque pantographe, la meilleure pression de réglage est la pression la plus faible pour laquelle le pantographe fonctionne encore d'une façon satisfaisante. En pratique, on règle l'appareil à une pression légèrement supérieure à celle ainsi définie en vue de parer à un avachissement possible des ressorts ou à de légères différences entre un appareil et un autre. L'emploi de pressions élevées entraîne, en effet, une usure plus grande des barres de frottement et des lignes, indépendamment des incidents qui peuvent résulter dans certains cas d'un soulèvement plus important des lignes.

La pression de réglage adoptée varie suivant le type d'appareil et aussi suivant les caractéristiques de la ligne. Pour les pantographes qui nous intéressent, les pr ssions moyennes ont les valeurs suivantes en kilogrammes,

Pantographes Société d'Etudes		10
Faiveley	à cornes	8
	sans cornes	8,500
Pantographes Oerlikon	à un seul archet	
	à cornes	8
	sans cornes	7,800
Pantographes S.A.C.M.		6,500

Ces valeurs correspondent à des pressions statiques qui peuvent varier en service assez sensiblement sous l'action des vibrations, de l'inertie et du vent. Les vibrations diminuent, comme nous l'avons indiqué, les écarts de pression à la montée et à la descente, l'inertie agit sur la pression en sens inverse du déplacement et il y a intérêt, pour diminuer son action, à alléger autant que possible le poids des

organes mobiles ; quant à l'action due au déplacement d'air, elle est très variable suivant la vitesse du pantographe dans l'air, la forme des caisses des locomotives et la position de l'appareil sur le toit, en raison des remous.

A titre d'indication, nous mentionnerons les essais faits par les Chemins de fer de l'Etat italien avec des pantographes à courant continu à un seul archet réglés pour une pression normale de 9 kg, au cours desquels on aurait trouvé les résultats consignés dans le tableau suivant :

Vitesses de marche

Pressions en kg	0	30	40	60	70	75	80	90	100	120
Locomotive 2C2										
Pantographe avant. .	9		10	12	13,5		15	16,8	19,5	29,5
— arrière. . .	9,5	10			12,5		13	13,5	14	
Locomotives B.B.B										
Pantographe arrière. . .	9,5	10				8,5				

De ce tableau, il résulte que la pression du pantographe avant pourrait, dans certaines locomotives, augmenter très sensiblement, tandis que pour le pantographe arrière, qui est celui normalement utilisé, lorsqu'on n'en élève qu'un, l'augmentation de pression serait moins importante et pourrait même devenir négative sur d'autres locomotives. On n'a pas à notre connaissance procédé à de semblables mesures sur les chemins de fer français.

b) *Dispositifs employés pour régler la pression.*

Dans la détermination des dispositifs de réglage, on s'efforce d'obtenir une pression aussi constante que possible dans toute la partie utile du développement du pantographe. Le problème revient, pour tous les appareils, à équilibrer pour chaque hauteur, le moment résistant dû au poids de la partie mobile augmenté de celui correspondant à la pression qu'on a choisie, avec le moment moteur qui est fonction de la tension des ressorts élévateurs et du bras de levier des manivelles. On détermine donc les ressorts et les manivelles tout en se réservant un certain réglage indispensable en service.

Les dispositifs de réglage utilisés sur les pantographes français peuvent se ramener en principe à deux types, suivant que la manivelle est à calage fixe ou bien que ce calage peut être modifié d'une façon

réelle ou fictive, soit en décalant seulement la manivelle sur son arbre soit, ce qui revient au même, en changeant l'inclinaison des ressorts.

Au premier type appartiennent les trois pantographes suivants :

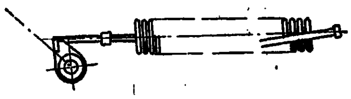


Fig. 11.

— Pantographe de la Société Alsacienne fig. 11. — Les ressorts sont attachés à des manivelles calées sur les arbres de commande.

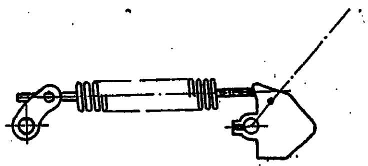


Fig. 12.

— Pantographe de la Société d'Etudes, fig. 12 et pantographe Oerlikon sans cornes, fig. 13. — Les manivelles sont remplacées par des cames sur lesquelles s'enroulent des chaînes attachées aux ressorts.

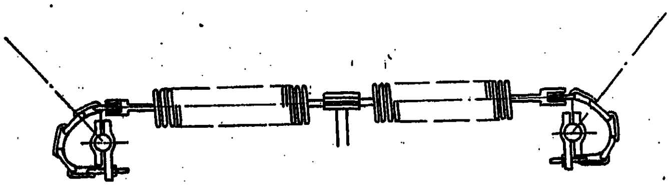


Fig. 13.

— Pantographe Faiveley, fig. 14. — Le calage de la manivelle est fixe, mais les ressorts sont attachés à une pièce filetée réglable qui

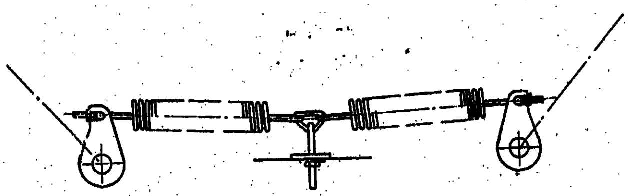


Fig. 14.

permet de faire varier leur inclinaison. Ceci a pour effet de modifier le bras de levier pour une position déterminée et de faire tourner la courbe de pression dans un sens ou dans l'autre.

— Pantographe Oerlikon à cornes fig. 15. — Chaque extrémité des ressorts est attachée à une bielle folle sur l'arbre, mais reliée par une tige filetée réglable à une pièce solidaire de l'arbre. On peut ainsi, en déplaçant la bielle, obtenir le même résultat qu'avec la disposition précédente.

Dans ces différents dispositifs, la tension des ressorts reste réglable, ce qui permet de faire varier à volonté la pression sur le fil en déplaçant la courbe de pression parallèlement à elle-même. En outre, les deux dernières dispositions permettent de faire tourner les courbes de réglage sensiblement autour de leur point milieu, soit pour les redresser, soit pour modifier la pression en bas ou en haut.

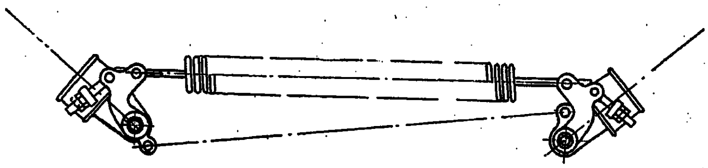


Fig. 15.

Il est du reste à observer que la pression sur le fil de contact est entièrement indépendante de la pression de l'air comprimé dans le cylindre pour tous les appareils élevés par l'air comprimé, quel qu'en soit le modèle.

c) *Amortissement à la montée et à la descente.*

Il est désirable qu'à la montée l'archet ne vienne pas heurter violemment le fil de contact, ce qui occasionne des chocs et des soulèvements de la ligne qui peuvent être préjudiciables à ses organes de suspension et occasionner des arcs aux pantographes voisins.

A la descente, il convient également de ralentir l'appareil dans la dernière partie de sa chute de manière à éviter les chocs sur le bâti tout en maintenant une coupure franche au moment où l'archet quitte la ligne.

Dans la plupart des pantographes décrits, les dispositifs d'amortissement sont, soit inexistants, soit peu efficaces, car il est à remarquer, en effet, que même l'emploi d'un robinet étranglant l'arrivée d'air dans le cylindre ne donne que des résultats illusoires lorsqu'il est employé avec certains pantographes.

Par contre, un amortissement efficace est obtenu par le dispositif utilisé dans les pantographes Oerlikon.

Pour ce dispositif représenté figure 16, l'air comprimé est introduit dans le cylindre par l'intermédiaire d'un robinet de réglage *r* qui est ouvert en grand lorsque l'appareil est abaissé. A mesure que le ressort R est comprimé, les bielles *b* se déplacent en même temps que les pièces de butée *e* qui, étant sollicitées par les ressorts élévateurs, continuent de s'appliquer dans le fond des rainures des bielles et le panto-

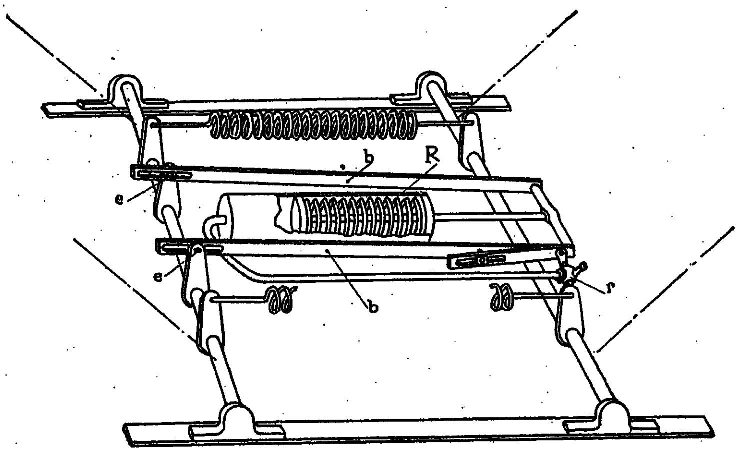


Fig. 16.

graphe s'élève. Ce mouvement des bielles fait en même temps tourner le robinet et le piston ralentissant sa course, le pantographe s'élève alors lentement.

d) *Barres d'usures.*

L'usure des barres de frottement s'exprime en général par la longueur du parcours effectué avant leur retrait. Les barres sont retirées du service lorsque leur épaisseur est suffisamment réduite pour qu'on ne puisse plus les laisser en service en toute sécurité, soit qu'elles risquent de se couper par le milieu ou de s'échapper des têtes de boulons ou rivets. L'épaisseur limite étant pratiquement la même quelle que soit l'épaisseur de la barre neuve, il s'en suit que toutes choses égales, une barre assurera un parcours d'autant plus grand qu'elle sera plus épaisse. Cette considération est importante à rappeler, car elle explique certaines différences qui peuvent paraître injustifiées lorsqu'on se contente simplement de comparer entre eux les parcours bruts de certaines barres.

Pour citer un chiffre, nous indiquerons que le parcours moyen global des barres est de 18 800 km pour la Compagnie d'Orléans,

correspondant à une usure de 4 mm sur 7 mm qui est l'épaisseur des barres neuves.

Les barres utilisées pour les pantographes sont en cuivre de 60 à 66 de dureté Brinel. ; elles sont graissées avec un mélange par parties égales de graisse consistante et de plombagine.

A la suite de bons résultats obtenus, notamment par le Nord-Sud, avec un alliage à base de zinc, la Compagnie d'Orléans a réalisé un appareil de laboratoire permettant d'essayer différents métaux et alliages avant de les essayer en service. Cet appareil est composé d'un plateau de 1 m de diamètre entraîné par un moteur et portant un anneau excentré en fil de caténaire normal serré par des mordaches réglables et devant lequel sont fixés les 2 frotteurs portant les barres à essayer. Ces barres sont appuyées par des ressorts sur le fil de caténaire et la pression est réglable.

Les résultats suivants ont été obtenus avec 2 frotteurs représentant les 2 archets d'un pantographe dans leur partie médiane; ils sont relatifs à un parcours de 1000 km des frotteurs, par rapport au fil ce qui correspond à 380 000 passages de pantographe sur le fil de ligne monté sur le plateau.

Nature de la barre	Usure de la barre en pour cent du poids	Usure de la ligne en pour cent du poids
Cuivre	0,385	0,08
Aldrey	9,3	0,08
Zinc (Nord-Sud)	13,8	0
Cuivre graphité	2,76	0,157
Laiton	0,21	0,02
Charbon	0,125	0,009

Les caractéristiques de ces différents métaux sont les suivantes : dureté Brinel.

Cuivre —		60 à 66
Aldrey —	Aluminium	98,6 à 98,7
	Silicium	0,5 à 0,7
	Magnésium	0,3 à 0,4
	Fer	0,2 à 0,3 existant dans Al

Cet alliage se rapproche de celui employé en Suisse en traction monophasée.

Nord-Sud —	Zinc	76
	Etain	16
	Cuivre	6
	Aluminium	2
Laiton	Cu	67
	Zn	33

A la suite de ces essais, il a été procédé à quelques vé ifications en service, mais si le résultat obtenu avec le Métal Nord-Sud s'est trouvé confirmé, puisque les barres devaient être retirées après une moyenne de 300 à 400 km, ils ne furent pas plus encourageants avec le laiton et le charbon qui semblaient devoir donner de bons résultats puisque les parcours correspondants n'ont pas dépassé respectivement 200 et 300 km.

L'explication de ces résultats peut être fournie par la différence qui existe entre l'état de la surface du fil de contact qui est lisse et polie sur l'appareil d'essai, alors qu'en ligne la surface de frottement, quoique plane, est recouverte de légères érosions qui agissent à la façon d'une lime sur le laiton et plus particulièrement encore sur le charbon. Les barres de cuivre sur lesquelles on avait pratiqué des rainures longitudinales garnies de graphite comprimé à la manière de certaines fourrures de coussinets, n'ont pas donné de bons résultats au Laboratoire et n'ont pas été essayées en ligne.

Au cours des essais préliminaires, on a constaté qu'un grippage important se produisait, même à faible vitesse, avec les barres de cuivre lorsqu'il n'y avait aucun graissage et c'est pourquoi, au cours des essais, on a été amené à graisser de la même manière et très légèrement les différentes barres de frottement, sauf le cuivre graphité et le charbon. En résumé, c'est encore les barres en cuivre qui donnent le meilleur résultat mais il est indéniable que l'usure des barres et de la ligne caténaire serait diminuée considérablement si l'on pouvait obtenir un graissage efficace. On constate, en effet, qu'avec la méthode employée actuellement, la caténaire reste rigoureusement sèche et qu'il en est de même des barres. C'est dans cette voie que les recherches devraient, semble-t-il, être entreprises mais la réalisation d'un graissage efficace reste difficile à obtenir comme nous avons pu le constater au cours d'expériences préliminaires.

IV. — Résultats obtenus en service.

a) *Mode de commande.*

— Les deux modes de commande conservent leurs partisans.

La commande par ressorts permet d'élever les pantographes d'une locomotive dont les réservoirs d'air sont vides, alors que l'emploi de l'air comprimé pour la descente permet d'obtenir avec des cylindres dimensionnés en conséquence une rupture rapide du contact entre les

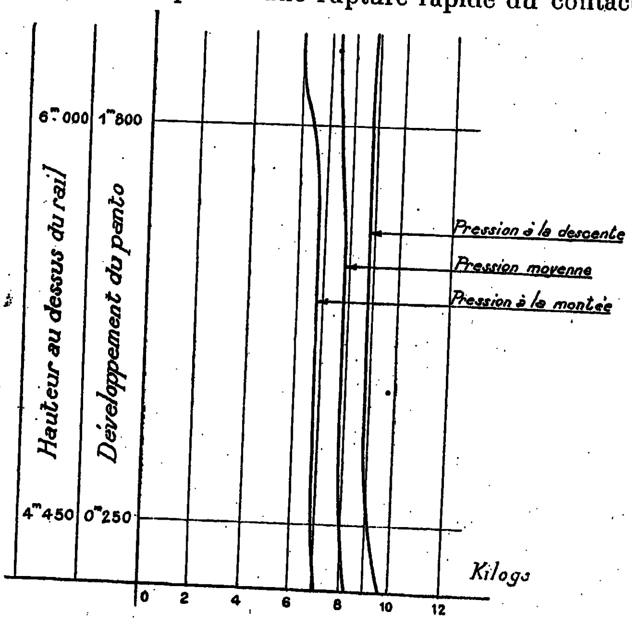


Fig. 17. — Courbes de réglage d'un pantographe Oerlikon.

archets et la ligne et un abaissement énergique des appareils. Par contre, aucun amortissement n'est réalisé, pas plus à la montée qu'à la descente sur ces appareils et, au cas exceptionnel où l'air comprimé viendrait à manquer alors que l'appareil est levé, par éclatement d'un tuyau en caoutchouc par exemple, on ne pourrait plus l'abaisser.

Les pantographes levés par l'air comprimé satisfont par contre au principe admis pour les appareils qui intéressent la sécurité, qui se mettent à l'arrêt en cas de suppression de l'énergie qui les commande, attendu que, lorsque l'air comprimé vient à manquer pour une raison ou pour une autre, l'appareil se replie automatiquement, ce qui donne toute sécurité. Ces appareils exigent, il est vrai, l'emploi d'une pompe

à air dont on se sert pour les faire monter lorsque les réservoirs sont vides mais, en faisant usage de robinets étanches pour isoler le réservoir des pantographes lorsque la machine reste en repos prolongé, la pression se maintient dans celui-ci pendant plusieurs jours et en pratique on ne se sert de la pompe que rarement.

En ce qui concerne la lenteur du mouvement de descente qui serait un défaut inhérent à ces pantographes, la disposition employée sur les pantographes Oerlikon, figure 16, montre qu'il n'en est rien puisqu'on peut, en dimensionnant convenablement le ressort antagoniste obtenir l'effort vertical de descente désiré aussi bien que par l'action de l'air comprimé. Pour les appareils élevés par air et dont la descente est obtenue uniquement par gravité, l'effort vertical de descente est évidemment limité, cependant il est très suffisant pour obtenir un fonctionnement satisfaisant. Enfin la commande à l'air comprimé permet seule d'obtenir un amortissement des chocs à la montée et à la descente comme nous l'avons indiqué précédemment.

b) *Pantographes à un ou deux archets.*

Le pantographe à un seul archet paraît devoir donner des résultats très intéressants, sa tête est en effet, sensiblement moins lourde, ce qui diminue les effets d'inertie, l'usure des barres de cuivre pour un pantographe est très diminuée et il doit en être de même pour la ligne et surtout la captation du courant se fait sans aucune étincelle, même au passage des points durs de la ligne, ce qui est dû à la grande souplesse de la suspension de l'archet dont les déplacements atteignent dans certains appareils jusqu'à 50 mm. La tension des ressorts de suspension de l'archet est également facilement réglable, contrairement à ce qui a lieu avec les autres appareils où aucun réglage n'est prévu et cela permet de maintenir ces ressorts toujours en état de remplir leur rôle.

c) *Pantographe avec ou sans cornes.*

A la suite d'une expérience de plusieurs années d'exploitation, les craintes d'accrochage qui ont conduit à construire des archets sans cornes ne se sont pas confirmées, tout au moins avec les lignes de contact à suspension caténaire simple ou double utilisées sur les réseaux français. Le pantographe sans cornes ne présente donc pas d'avantage marqué par rapport au pantographe avec cornes. La Compagnie du Midi utilise uniquement des pantographes avec cornes, la Compagnie

P.L.M. n'emploie plus que des appareils sans cornes, sauf sur une locomotive et la Compagnie d'Orléans utilise les deux types en quantités sensiblement égales ; toutefois les pantographes des nouvelles locomotives qu'elle a commandées seront avec cornes.

d) *Courant capté.*

Le courant à capter par les pantographes d'une locomotive, à 1 500 V peut dépasser 2 000 A au moment du démarrage, en vitesse il peut atteindre 1 200 à 1 500 A. Des courants de cette valeur peuvent être captés dans de bonnes conditions avec un seul des appareils décrits.

Avec un pantographe à un seul archet employé à la Compagnie d'Orléans, on capte 1 200 A à 120 km à l'heure sans trace d'étincelles.

e) *Emploi des pantographes.*

Il y a généralement deux pantographes par machine. On utilise habituellement un seul pantographe en prise, ce qui est beaucoup plus économique et donne une sécurité d'exploitation plus grande, puisqu'on dispose ainsi d'un appareil de réserve en cas d'avarie. Pour tenir compte de ce que le trouble exercé par le déplacement d'air sur le pantographe arrière est moindre que sur le pantographe avant, c'est le premier cité qu'on utilise généralement de même si on se servait du pantographe avant, celui-ci risquerait, en cas d'avarie, de mettre en même temps hors service le pantographe arrière. Aux grandes vitesses, on emploie de préférence les deux pantographes à la fois.

TRANSFORMATEURS DE MESURE
PROGRÈS CONSTRUCTIFS RÉCENTS
DISCUSSION DES RÈGLES DE NORMALISATION [1]

par M. A. ILIOVICI

Ingénieur Conseil de la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs.

Dans une première partie, l'auteur indique quelque perfectionnements récents apportés à certains des transformateurs décrits dans son rapport à la Semaine de novembre 1930, deux nouveaux modèles de transformateurs de courant et un de transformateur de tension.

Dans la deuxième partie, il discute les règles de normalisation françaises et Internationales, particulièrement les règles concernant la rigidité diélectrique.

I. — PERFECTIONNEMENTS CONSTRUCTIFS RÉCENTS.

Dans notre rapport à la Semaine de discussion de novembre 1930, nous avons étudié les transformateurs de mesure principalement au point de vue de leur précision. Nous allons compléter ce rapport, soit en indiquant quelques perfectionnements constructifs apportés aux transformateurs déjà décrits, soit en décrivant des types nouveaux.

a) *Transformateurs de courant*

Transformateur compoundé. — Dans notre rapport de 1930, nous avons décrit deux types de transformateurs compoundés. Dans un premier dispositif (fig. 2 du rapport cité) le compoundage est produit par deux enroulements agissant chacun sur la moitié des tôles du circuit magnétique.

Dans le deuxième dispositif (fig. 3 du rapport cité) l'enroulement de compoundage est monté sur un électro-aimant auquel le circuit magnétique du transformateur sert d'armature. Ce dispositif, de beaucoup le plus employé, convient très bien aux transformateurs à circuit magnétique cuirassé.

Le premier, par contre, convient particulièrement aux transformateurs à circuit magnétique simple, comme celui en forme de tore.

(1) Ce rapport, présenté à la séance du 25 avril de la 6e Section de la Société française des Electriciens sera discuté à la Semaine de discussions de novembre 1932.

Pourtant, il est difficile d'obtenir deux paquets de tôles parfaitement identiques, ce qui est nécessaire pour avoir une induction mutuelle nulle entre l'enroulement de compoundage et chacun des enroulements principaux.

Ce résultat peut être obtenu facilement avec des tôles ajourées analogues à celles de la fig. 1. Dans cette figure, F_1 et F_2 sont des fentes, C_1, C_1', C_2, C'_2, les enroulements de compoundage ; S l'une des spires du primaire ou du secondaire. On voit facilement, en suivant le tracé des lignes de force produites par les enroulements C_1, C'_1, C_2, C'_2 que le flux qu'ils produisent à travers les spires analogues à S est nul, ce qui est exigé pour avoir un compoundage régulier.

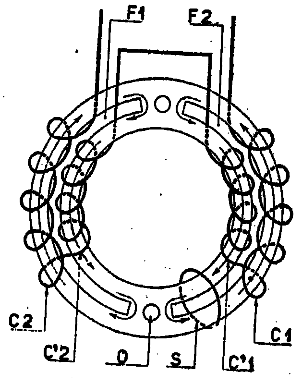


Fig. 1. — Schéma d'un nouveau dispositif de transformateur de courant « compoundé » (C. d. C).
F_1, F_2, fentes dans le circuit magnétique; O, trou canalisant les lignes de forces magnétiques; S, spire d'un circuit principal ; C_1, C_2, C'_1, C'_2, enroulement de compoundage.

Auto-compoundage. — Dans les transformateurs compoundés, le circuit de compoundage est alimenté par une source de tension constante ; mais on peut aussi l'alimenter à l'aide d'un courant fourni par le transformateur lui-même ou par un autre transformateur de courant.

Ce dispositif, qui est surtout commode pour les transformateurs à barres ou les transformateurs sans primaire, que l'on monte directement sur le câble dont on veut mesurer le courant, a été breveté en 1923, sous le nom de transformateur « auto-compoundé », par la Compagnie pour la fabrication des Compteurs et repris depuis quelques temps à l'étranger, en particulier en Angleterre et en Allemagne.

Son efficacité est moindre que celle du transformateur « com-

poundé », parce que le compoundage *optimum* correspond à une valeur déterminée du courant dans l'enroulement auxiliaire. Or, avec le courant variable obtenu dans les transformateurs « auto-compoundés », on aura une valeur du courant pour lequel le compoundage sera très bon, mais les résultats seront moins bons au fur et à mesure qu'on s'éloignera de cette valeur.

Pourtant, grâce à certains artifices, on peut arriver à améliorer le transformateur pour de larges limites du courant débité.

A remarquer que ce dispositif ne présente pas d'avantages pratiques sur le transformateur compoundé, car on dispose toujours d'une source auxiliaire à tension constante : le réseau lui-même dans le cas de la basse tension, le secondaire des transformateurs de tension dans presque tous les cas.

Transformateur barre (fig. 2). Dans ce transformateur, le primaire est formé d'une barre qui est intercalée dans l'une des barres du circuit ou dans l'un des câbles de l'installation. Ce transformateur ne peut être construit que pour des courants assez forts (le nombre d'ampère-tours secondaires étant égal au courant primaire en ampères).

On aurait pourtant intérêt à descendre le plus bas possible, car ce type de transformateur est simple et présente des avantages techniques sérieux : montage facile, forte résistance aux courts-circuits, facilité d'isolement sans emploi d'huile....

Pour obtenir de bons transformateurs barres avec de faibles courants primaires, on réduira le plus possible la longueur moyenne du circuit magnétique, on augmentera la section de celui-ci et on emploiera des matériaux magnétiques à grande perméabilité initiale.

La fig. 2 représente un transformateur barre de la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs, dans lequel on a réduit le plus possible la longueur moyenne du circuit magnétique C_m, en donnant à la barre B une forme cylindrique et en montant directement les tôles en forme d'anneau sur le tube isolant T, celui-ci, ainsi que l'enroulement secondaire, occupant le minimum de place. Le tube isolant T est protégé par deux porcelaines p et p', qui ne pénètrent pas sous le circuit magnétique; une enveloppe en tôles E protège l'enroulement secondaire. Ce modèle peut être construit aussi pour être employé à l'extérieur.

Pour fixer les idées, nous indiquerons qu'on construit des transformateurs de ce type pour une tension de service jusqu'à 35 kV et pour des courants primaires de 150 à 2 000 A. — Pour 150 A, 50 p:s,

le transformateur a une puissance de précision classe C du règlement U. S. E. de 5 VA ; pour 300 A, il a une puissance de précision de 30 VA classe C et 10 VA classe B ; pour 750 A, on obtient 5 VA classe A, 30 VA classe B et 90 VA classe C ; pour 1 500 A, on obtient 15 VA classe A, 50 VA classe B et 140 VA classe C.

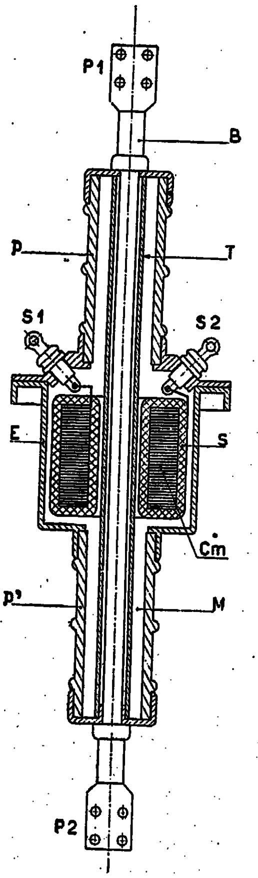


Fig. 2. — Transformateur « barre » (C. d. C.).
B, P_1, P_2, barre primaire; S, S_1, S_2, enroulement secondaire ; Cm, circuit magnétique ; T, tube isolant ; *p*, *p'*, porcelaines de protection ; E, enveloppe métallique ; M, masse de remplissage.

Au point de vue de la résistance aux surintensités, le transformateur est de classe 3, ce qui veut dire qu'il satisfait aux conditions les plus sévères du règlement U. S. E. (publication 92).

Transformateur type ω (fig. 3). Si on veut obtenir un transformateur de courant à l'air libre, pour des tensions élevées et avec un nombre suffisant de spires primaires, la principale difficulté que l'on

rencontre c'est d'avoir des lignes de fuite suffisamment grandes dans les isolants, sans augmentation excessive de la longueur du circuit magnétique. Dans notre rapport de 1930, nous avons décrit deux dispositifs (fig. 11 et 12 du dit rapport) qui ont permis de vaincre cette difficulté.

Dans le premier dispositif, on obtient de grandes spires au primaire, de forme à peu près rectangulaire et qui tendent à se déformer en cas de court-circuit ; dans le deuxième cas, le bobinage est d'une réalisation malaisée.

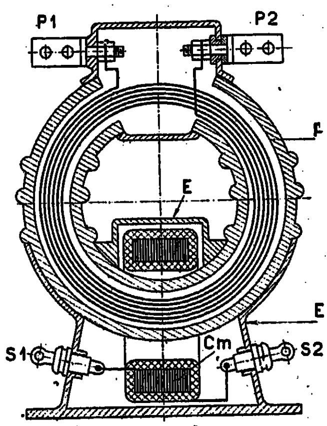


Fig. 3. — Transformateur type ω (C d. C.).

P_1, P_2, enroulement primaire; S_1, S_2, enroulement secondaire; Cm, circuit magnétique ; *p*, porcelaine isolante ; E, E, enveloppes métalliques.

Dans le nouveau transformateur que la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs désigne sous le nom de « *type* ω », le primaire P_1, P_2 est bobiné dans un tube isolant *p* en forme d'anneau, le secondaire sur un circuit magnétique *Cm* qu'on peut enfiler directement sur le tube isolant (fig. 3). Les spires primaires sont ainsi pratiquement circulaires et ne se déforment plus en cas de courts-circuits ; de plus, la forme circulaire du tube facilite beaucoup la réalisation du bobinage.

Perfectionnements aux transformateurs type Φ.

Dans notre rapport de 1930, nous avons décrit sous le nom de transformateur type Φ, un transformateur de courant pour très hautes tensions à air libre, formé de deux transformateurs en cascade, dont le

premier sert à obtenir un courant suffisamment fort pour permettre de réaliser le deuxième sous forme de transformateur barre.

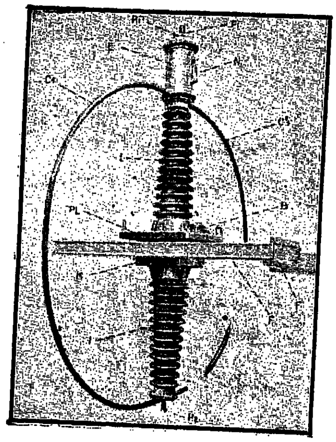


Fig. 4. — Transformateur de courant type Φ (C. d. C.).

Nous reproduisons de nouveau cet appareil fig. 4. Le premier transformateur est placé au-dessus de l'isolateur « traversée » et enfermé

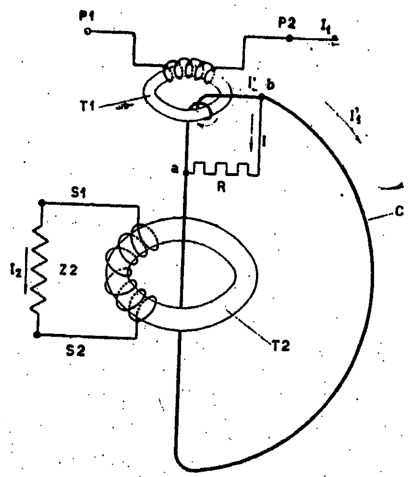


Fig. 5. — Schéma d'un transformateur Φ à barre shuntée P_1, P_2, primaire du transformateur T_1, parcouru par le courant I_1 ; C (circuit) shunté par la résistance R ; I, courant dans R ; I'_1, dans C ; I', courant total ; S_1, S_2, enroulement secondaire débitant un courant I_2 dans un circuit Z_2 (appareils de mesure, relais, etc.).

dans une enveloppe cylindrique ; le deuxième transformateur est placé au milieu de la traversée.

La fig. 4 représente un transformateur Φ pour 150 kV; cet appareil

a une puissance de précision de 50 VA classe A, 100 VA classe B et 250 VA classe C.

Le transformateur de même type pour 220 kV a une puissance de précision de 30 VA classe A, 60 VA classe B et 150 VA classe C.

Pour obtenir des transformateurs de grande précision, on constitue

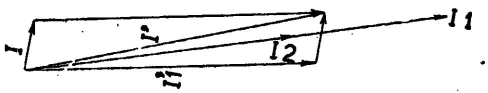


Fig. 6. — Diagramme de fonctionnement d'un transformateur Φ à barre shuntée. Les lettres ont la même signification que dans la figure précédente.

le secondaire du transformateur T_1 (fig. 5) de plusieurs spires ; de plus, pour amener le courant I_2 à être en phase avec I_1 on shunte les spires du transformateur T_1 à l'aide d'une résistance R.

On sait que le courant secondaire d'un transformateur de courant

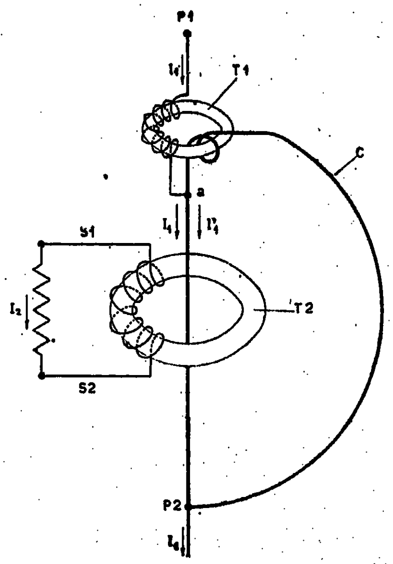


Fig. 7. — Schéma d'un transformateur Φ pour courants relativement intenses. T_1, T_2, deux transformateurs en cascade; P_1, P_2, extrémités du circuit primaire; S_1, S_2, circuit secondaire parcouru par le courant I_2; C, circuit de liaison entre les deux transformateurs; I_1, courant primaire; I'_1, courant induit dans le circuit C.

est en général déphasé en avance sur le courant primaire. Le diagramme fig. 6, montre que, pour un réglage approprié de la résistance R, le courant secondaire I'_2 du transformateur T_2 peut être en phase avec le courant I_1 du transformateur T_1.

Dans ce diagramme, I et I'_1 sont les courants dans la résistance R et dans la spire fortement inductive C, I' le courant dans le secondaire du transformateur T_1 ; ce courant est en avance sur le courant primaire I_1 ; le courant I_2 étant en avance sur I'_1 peut être amené en phase avec I_1 (fig. 6).

A remarquer que la puissance apparente consommée par les appareils formant le circuit Z_2 est faible devant celle du circuit C ; il en résulte que la précision de l'ensemble est pratiquement indépendante du nombre d'appareils alimentés.

Lorsque le courant à mesurer, tout en étant trop faible pour per-

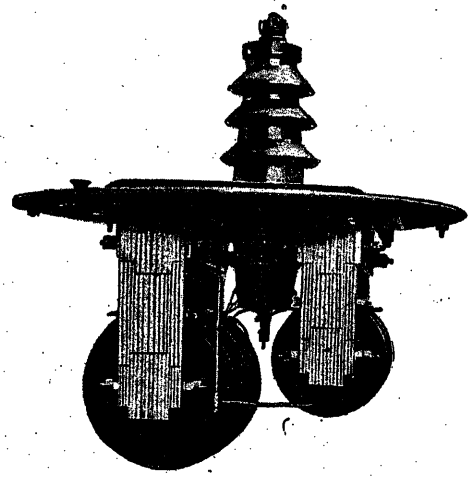


Fig. 8. — Vue d'un élément de transformateur de tension en cascade à transformateurs auxiliaires, cuve en tôle enlevée (C. d. C.).

mettre l'emploi d'un transformateur « barre », n'est pas négligeable, on peut monter le transformateur Φ suivant le schéma de la fig. 7, les connexions étant faites de façon que le courant primaire I_1 du transformateur T_1 et le courant secondaire I'_1 s'ajoutent pour former le courant primaire du transformateur T_2. On obtient ainsi un plus grand nombre d'ampère-tours pour T_2, d'où une plus grande précision. De plus, l'entrée et la sortie du circuit primaire se faisant aux deux extrémités de l'isolateur de traversée, donne souvent des commodités pour le montage.

b) *Transformateurs de tension.*

Dans ces transformateurs, comme dans les transformateurs de courant, on cherche à réduire le plus possible la quantité d'huile em-

ployée et même à supprimer complètement l'huile, surtout pour les transformateurs de haute et très haute tension.

Si on emploie, dans les circuits triphasés, trois transformateurs de tension, montés en étoile avec neutre à la terre, on peut obtenir fa-

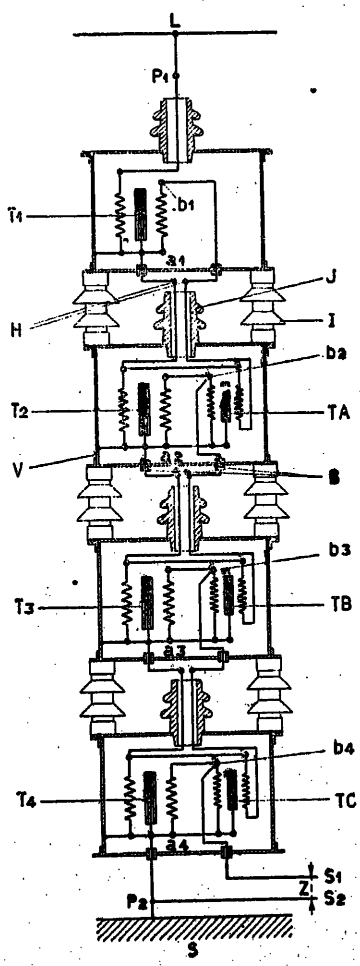


Fig. 9. — Schéma de montage d'un transformateur de tension en cascade. T_1, T_2, T_3, T_4, les transformateurs principaux; T_A, T_B, T_C, les transformateurs auxiliaires; L, ligne; P_1, P_2, bornes primaires; S_1, S_2, bornes secondaires; I, J, porcelaines; H, bornes de liaison entre éléments voisins; a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3, a_4, b_4, bornes secondaires des transformateurs principaux; V, cuve métallique.

cilement l'isolement du reste de l'enroulement par rapport à la masse.

Dans ce qui suit, nous signalons deux solutions :

Transformateur en cascade. — Nous avons parlé dans notre rapport de 1930 de cette solution du problème et nous avons donné quelques

indications sur les transformateurs en cascade avec transformateurs auxiliaires de la Compagnie pour la Fabrication des Compteurs.

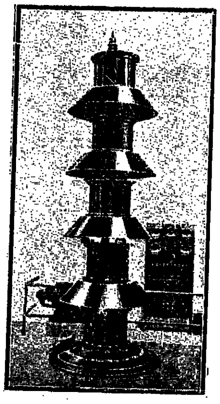


Fig. 10. — Vue d'un transformateur de tension en cascade type extérieur par 150 kV.

Voici quelques détails constructifs pour les types normaux.

Chaque élément (fig. 8) se compose d'un transformateur principal

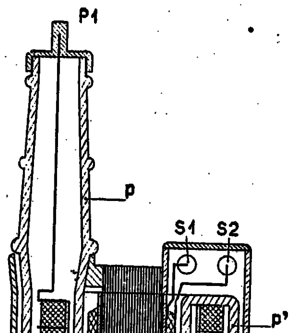


Fig. 11. — Schéma d'un transformateur de tension, type *h* (C. d. C.). P_1, P_2, bornes primaires; S_1, S_2, bornes secondaires; *p*, *p'*, porcelaine isolante de forme spéciale; *Cm*, circuit magnétique; E, enveloppe métallique.

(à gauche de la figure) de 30 kV et d'un transformateur auxiliaire de rapport 100 V/100 V, supportés par un même couvercle et enfermés dans une cuve en tôle (voir fig. 10). Les connexions sont établies de

façon que deux fils seulement passent d'un élément à l'élément voisin ; ces fils traversent l'une des porcelaines qui supportent et isolent les cuves entre elles.

La fig. 9 donne le schéma du montage d'un transformateur à 4 éléments pour 120 kV.

La fig. 10 représente un transformateur en cascade 150 kV type extérieur. On remarque les « paraneige » de forme tronconique destinés à empêcher la neige de s'accumuler sur les isolateurs et dans l'espace libre entre les étages successifs.

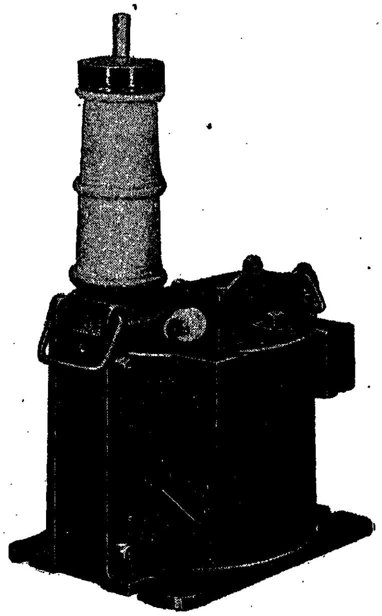


Fig. 12. — Vue d'un transformateur de tension, type *h* (C. d. C.).

Les liaisons entre les éléments sont réalisées à l'aide de connexions en forme de ressorts et il est facile d'augmenter le nombre d'éléments si la tension du réseau a été augmentée.

Transformateur type h. — Dans ce transformateur, l'isolement de la haute tension par rapport à la basse tension et à la masse est obtenu à l'aide d'un isolateur en porcelaine de forme spéciale. La fig. 11 représente une coupe du transformateur : *pp'* est la porcelaine, dont la partie principale a la forme d'une rigole cylindrique ouverte vers le bas ; cette porcelaine enveloppe l'enroulement primaire P_1 P_2 sur 3 faces, la face inférieure restant seule libre. Le circuit magné-

tique *Cm* porte l'enroulement secondaire S_1, S_2 ; E est une enveloppe métallique de protection.

L'extrémité P_2 étant à la masse, la ligne de fuite pour chaque point de l'enroulement haute tension est d'autant plus grande que le potentiel de ce point par rapport à la masse est plus élevé.

La fig. 12 représente un transformateur type *h*.

II. — Discussion des règles de normalisation.

Presque tous les pays ont établi des « Règles » auxquelles doivent satisfaire les transformateurs de mesure de courant et de tension. A la réunion de Stockholm de juin 1930, la Commission Electrotechnique Internationale a établi des Règles Internationales qui ne sont pas encore définitives, mais le deviendront probablement avec peu de changements.

Les diverses « Règles » concernent principalement :

1° La précision des transformateurs de courant et de tension.

2° Leur échauffement en régime permanent.

3° La rigidité diélectrique.

4° La résistance aux surintensités des transformateurs de courant, au point de vue thermique et dynamique.

Les conditions imposées sont souvent contradictoires, surtout si on les complète par la condition que le prix du transformateur ne devienne pas prohibitif.

Ainsi, un transformateur de grande précision a des chances de chauffer plus qu'un transformateur industriel et de résister moins bien aux surintensités.

En effet, pour obtenir un transformateur de précision sans volume excessif de fer et de cuivre, on mettra des spires nombreuses en fil de diamètre relativement faible : deux conditions qui sont défavorables au point de vue de l'échauffement et des surintensités.

Pour obtenir, par contre, un transformateur ayant une grande rigidité diélectrique, on doit dimensionner largement l'isolement, ce qui, en général, amène à un circuit magnétique de grande longueur, et à un transformateur moins précis ou d'un prix élevé.

De même, les transformateurs qui résistent mieux aux surintensités sont les transformateurs à barres, pour lesquels le nombre d'ampère-tours est limité — d'où difficultés d'obtenir dans certains cas une précision suffisante.

Heureusement que, dans la pratique, on n'a pas besoin en même

temps d'une grande précision, d'une grande rigidité diélectrique et d'une forte résistance aux surintensités.

Ainsi, les transformateurs étalons sont employés dans des conditions bien déterminées et ne risquent pas de forts court-circuits. Par contre, les transformateurs qui ont à craindre les surtensions ou les surintensités sont destinés à alimenter des appareils de mesure et des relais de protection, ce qui en général ne demande qu'une précision moyenne (par ex. type B des règles françaises).

On est donc amené à construire plusieurs types de transformateurs, mais il faut veiller à ne pas trop multiplier le nombre de modèles, car ce serait contraire aux besoins de la fabrication en série et augmenterait le prix de revient.

D'autre part, dans les « Règles » on ne distingue pas assez entre les essais individuels et les essais d'appareils types, et on ne prévoit pas non plus des essais de durée, qui seraient d'ailleurs souvent difficiles à réaliser.

Ainsi, par exemple, les épreuves de surintensité ne peuvent être effectuées que sur des appareils types, parce que ces épreuves sont trop difficiles à faire et on risque de détruire le transformateur; de plus, tous les appareils de même type se comportent de la même façon au point de vue des surintensités. *A remarquer que les règles françaises sont actuellement les seules à prévoir des épreuves de surintensités,* d'ailleurs très sévères. Dans les anciennes règles allemandes, on prévoyait des essais beaucoup moins sévères qu'en France et, dans les nouvelles de 1932, on n'en parle plus. Pourtant, ces épreuves sont très importantes et ont été inscrites dans les règles USE à la demande des exploitants de réseaux. Leur introduction dans les règles a amené les constructeurs français à faire des essais intéressants, à apporter de grands perfectionnements à la construction des transformateurs de courant et à augmenter largement les conditions de sécurité.

La question de l'épreuve diélectrique est plus compliquée.

Les matériaux isolants sont, en général, de constitution complexe; certains d'entre eux ont des qualités qui varient avec le temps (vieillissement); un transformateur construit avec ces matériaux pourra être très bon au moment de la réception et devenir médiocre à la longue.

Le choix des matériaux isolants est donc très important et leurs défauts ne peuvent être décelés que par des essais de durée. Ces essais ne peuvent être faits que sur des appareils types et sont difficiles à réaliser comme essais de réception; mais ils sont effectués constam-

ment par les constructeurs sérieux, soit sur les matériaux eux-mêmes, soit sur des transformateurs terminés.

Un essai de réception de faible durée (tel l'essai de 1 mn, que l'on effectue habituellement), s'il est fait à une tension appropriée, permettra de déceler certaines défectuosités imprévues provenant, soit de la matière, soit d'erreurs de montage; il permettra aussi de savoir si le transformateur sera susceptible de supporter certaines surtensions de faible durée.

La tension d'épreuve devrait être assez élevée pour faire apparaître certains défauts que l'on ne décelerait pas à tension nominale, dans un essai de courte durée. Mais elle ne doit pas être trop forte, car elle risque de fatiguer l'isolement et de réduire la vie de l'appareil. La formule donnant la tension d'épreuve a été beaucoup discutée en France et à l'étranger.

En France on est arrivé, pour les transformateurs de mesure, à la formule 2U + 1000 V), U étant la tension la plus forte du réseau dans lequel le transformateur doit être monté. Elle est employée aussi pour les transformateurs de puissance et pour l'appareillage.

En Angleterre, on emploie la formule (2,25 U + 2 000); en Amérique, la même formule pour les transformateurs de courant et (2U + 1 000) pour les transformateurs de tension.

D'autre part, dans sa réunion de Stockholm de juin 1930, la Commission Electrotechnique Internationale a adopté la formule (2U + 1 000) sur laquelle tous les délégués étaient d'accord.

Pourtant, dans les règles allemandes pour 1932, on prévoit des essais d'isolement beaucoup plus sévères : ainsi, pour des transformateurs de 3 kV et au-dessus, les tensions d'essai entre enroulements et masse répondent à peu près à la formule (2,2 U' + 20 000). En fait, la tension U' est inférieure d'environ 15 pour 100 à la tension U des formules précédentes, de sorte que la formule allemande est en réalité moins sévère qu'elle ne paraît.

Mais il s'agit de savoir s'il y a intérêt à essayer les transformateurs à des tensions très supérieures à la tension nominale et si on augmente ainsi la sécurité.

Ceci n'est nullement évident, l'essai de 1 mn n'indique pas, quelle que soit la tension d'épreuve, si les matériaux ne se transforment pas avec le temps; d'autre part, un essai sous tension trop élevée risque d'amorcer des défauts dans les matières isolantes et de raccourcir leur vie.

Si on veut éviter cet inconvénient, on est amené à construire des transformateurs beaucoup plus coûteux qu'il n'est utile.

La formule (2U + 1 000) appliquée jusqu'à présent, s'est montrée suffisante pour assurer la sécurité de fonctionnement dans tous les cas normaux, lorsque les matériaux utilisés sont de bonne qualité. Or, les règles ne doivent s'appliquer que dans les cas normaux.

Si dans certains cas exceptionnels on craint des surtensions exceptionnelles, rien n'empêche de choisir dans la gamme des transformateurs d'un constructeur, des appareils de tension nominale plus élevée que celle du réseau. Pour les transformateurs de courant, qui risquent de souffrir davantage des surtensions, ce choix ne présente absolument aucune difficulté. Pour les transformateurs de tension, on sera amené à faire un bobinage primaire spécial ; mais il vaut mieux faire une construction spéciale pour un petit nombre d'appareils que de rendre plus onéreuse la construction des transformateurs de série.

En résumé, à notre avis, la formule (2U + 1 000) est suffisante pour les appareils de construction soignée et pour les cas normaux.

En fait, les transformateurs de bonne fabrication peuvent subir des tensions d'essai beaucoup plus fortes ou de durée beaucoup plus longue. Ainsi, par exemple, des transformateurs de tension de la Compagnie pour la fabrication des Compteurs pris parmi les types courants, sans aucun choix, ont supporté une tension 2U pendant une durée allant jusqu'à 8 à 9 h ; mais des essais de cette durée ne peuvent être effectués que sur des transformateurs types.

Les essais individuels ne peuvent être que de faible durée et à une tension modérée; ils ne donnent pas de renseignements suffisamment complets sur les qualités des matières isolantes pour qu'on leur accorde l'importance que quelques ingénieurs semblent leur attribuer.

Signalons que certains constructeurs indiquent, dans leurs notices, la tension de service (tension nominale) et la tension d'épreuve, de sorte que l'on peut toujours choisir le transformateur qui convient si l'on veut lui appliquer une tension d'épreuve supérieure à celle résultant de la formule (2U + 1 000).

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

TRACTION

XXIII[e] Congrès International de La Haye. 26 juin-4 juillet 1932. 1 brochure de 21 × 28 cm, de 24 pages, 12 figures Publiée par l'Union Internationale de Tramways, Chemins de fer d'intérêt local et Transports Publics automobiles. (Don du Secrétaire général du Congrès).

18[e] question. Moyens d'éviter l'usure ondulatoire des rails. Communication de M. Thomas, Directeur des Tramways de Cologne. Causes de l'usure ondulatoire. Essais. Influence du sous-sol. Ballastage des rails. Degré d'encastrement des rails. Voies surélevées, voies souterraines, chemins de fer. Rapprochement des résultats et de ceux publiés par la Commission chargée des études de l'usure ondulatoire.

TÉLÉGRAPHIE. — TÉLÉPHONIE
TRANSMISSIONS PAR ONDES

Les Cadres de réception pour champs magnétiques alternatifs à basse fréquence, par Claude BOURGONNIER et Michel DUREPAIRE. Une brochure de 22 × 27 cm. 8 pages, 10 fig. Editée par la Revue Générale de l'Electricité, 12 place de Laborde, Paris. (Don des auteurs)

Les auteurs se proposent de déterminer le nombre de spires optimum à disposer sur un cadre destiné à être placé dans un champ magnétique alternatif à basse fréquence, pour obtenir aux bornes d'un condensateur accordé avec le cadre une surtension maximum.

Le problème est d'abord résolu par l'analyse; puis les auteurs exposent les résultats d'expériences entreprises pour contrôler la validité des hypothèses sur lesquelles ils s'appuient. Cette question est liée aux conditions de réception des signaux émis par un câble parcouru par des courants alternatifs à fréquence musicale (procédé M. W. A. Loth).

Note relative à l'élimination des parasites produits dans les récepteurs de T.S.F par le fonctionnement des appareils et installations électriques. X..., ingénieur des P.T.T. — Brochure 21 × 21 cm, 1 planche figures. 31 pages.

Les bruits parasites dus au fonctionnement de certaines installations électriques sont très gênants pour l'audition des postes de T.S.F. L'auteur rappelle d'abord l'origine des parasites habituellement constatés, troubles causés par les lignes électriques à haute tension, et troubles causés par les brusques variations d'intensité des circuits électriques. L'auteur expose les différents dispositifs destinés à supprimer ou à atténuer ces bruits parasites. Cette brochure constitue la source la plus complète et la plus récente dont on dispose sur le sujet.

APPAREILS ET MÉTHODES DE MESURE

Mémoires de la Chambre Centrale des Poids et Mesures de l'U.R.S.S. présentés au Comité consultatif d'Electricité et de Photométrie. — Un volume broché 15 × 21 de 145 pages, 31 figures. Edité par la Chambre Centrale des Poids et Mesures de l'U.R.S.S. à Leningrad et Moscou (1932). Don de la Chambre Centrale des Poids et Mesures.

L'ouvrage contient d'abord en langue française, puis en langue russe,
des mémoires concernant les méthodes et instruments servant à la comparaison des étalons électriques, et photométriques.
les programmes des travaux de la Chambre Centrale des Poids et Mesures sur le passage des unités internationales électriques et magnétiques aux unités absolues.

BAR-LE-DUC. — IMP. COMTE-JACQUET.

Le gérant : Alfred MAGNIER.

5e série, tome II, n° 23. Novembre 1932

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

DÉFINITIONS, CALCULS ET MESURES DES CONSTANTES DES MACHINES SYNCHRONES UTILISÉES AUX ÉTATS-UNIS DANS LES ÉTUDES DE STABILITÉ DES RÉSEAUX (1)

par M. M. BARRÈRE,

Ingénieur Conseil du « Matériel Electrique S. W. »

Définition des termes employés. — Réactances (réactances de fuite de l'induit; réactances de réaction d'induit : réactances synchrones; réactances transitoires; réactances subtransitoires; réactances de séquence négative; réactances de séquence nulle) — Constantes de temps. — Application à un alternateur à pôles saillants à axe vertical. — Conclusions.

Avec l'augmentation des puissances transportées par les lignes de transmission et les grandes distances séparant généralement les centrales hydroélectriques des centres de consommation, les questions de stabilité ont pris une grande importance et les ingénieurs américains en particulier ont fait depuis plusieurs années des études et des essais dans le but d'assurer la plus grande stabilité possible aux réseaux de transport.

L'expérience obtenue en exploitation a permis également la vérification des calculs effectués et des prévisions.

Le calcul des courants de court-circuit et de réglage des relais, et les études de stabilité ont conduit à considérer un certain nombre, un peu élevé d'ailleurs, de valeurs caractéristiques relatives aux machines synchrones; jusqu'à ces derniers mois, les définitions de ces facteurs n'étaient pas toujours très précises et il était difficile de suivre et de comparer les travaux d'auteurs différents. Aussi, un Comité a été récemment constitué aux Etats-Unis pour définir les expressions ayant trait à l'interconnexion et à la stabilité et une de ses sections a remis à l'American Institute of Electrical Engineers un projet de standardisation des caractéristiques intervenant dans l'étude des machines synchrones (2).

(1) Cette communication sera présentée et discutée au cours de la Semaine de novembre 1932 de la Société Française des Electriciens.
(2) Report of Subject Committee on definitions. « *Proposed definitions of terms used in power system studies* », A.I.E.E. Convention, 25 janvier 1932.

Il est d'ailleurs entendu que les valeurs indiquées correspondent à des circuits magnétiques non saturés (en tenant compte de la saturation. on introduirait de très grandes complications dans les calculs et des corrections peu précises), et que leur application aux calculs de court-circuit est relative à des machines fonctionnant à vide avant l'établissement du court-circuit. On peut d'ailleurs tenir compte de l'état en charge initial, suivant les indications données, par exemple par M. Fallou (Semaine d'octobre 1926, 4e Section, de la Société française des Electriciens).

On admettait, lors des premières études, que l'intensité du courant dans les circuits, au cours d'un essai, avait une influence négligeable sur les valeurs obtenues pour les réactances; on recherche maintenant cette influence qui, dans certains cas, est très appréciable.

Etant donné l'intérêt du sujet, j'ai cru utile de réunir et de vous présenter ces définitions, les formules de calcul et les méthodes de mesure, en citant des résultats obtenus sur un alternateur entraîné par turbine hydraulique.

Nous adopterons ci-dessous les symboles usités en Amérique, pour rendre plus facile la lecture des études parues, en indiquant cependant, le cas échéant, la correspondance avec les notations usuelles françaises.

Les indices d et q sont affectés respectivement aux valeurs relatives à l'axe direct (axe des pôles inducteurs) et à l'axe transversal (axe d'entrepôles), et les quantités vectorielles sont décomposées suivant ces 2 axes. Les grandeurs sont exprimées en « unité », c'est-à-dire, en fraction de la valeur normale de la quantité correspondante ; pour les réactances, elles sont exprimées en fraction des « ohms normaux », ces derniers étant le quotient de la tension étoilée normale par le courant efficace normal. Ce système d'unités paraît un peu obscur au premier abord puisqu'on égale des quantités dont les équations de dimensions sont différentes, mais il est commode pratiquement car il évite d'encombrer les calculs par des coefficients qui ne varient pas avec le phénomène considéré.

Définitions des termes employés.

Ohms normaux : quotient de la tension efficace étoilée normale par le courant efficace normal.

Réactance synchrone relative à l'axe direct : x_d. — Rapport du terme fondamental de la chute de tension réactive dans l'induit dû à la com-

posante fondamentale du courant de l'induit suivant l'axe direct, à cette dernière composante, en régime permanent.

Réactance synchrone relative à l'axe transversal : x_q. — Elle est définie comme x_d, mais pour l'axe transversal.

Réactance transitoire relative à l'axe direct : x'_d. — Rapport du terme fondamental de la chute de tension réactive dans l'induit dû à la composante fondamentale du courant symétrique de l'induit suivant l'axe direct, à cette dernière, lorsque la charge est brusquement appliquée et en négligeant la partie très rapidement décroissante de ce courant dans les premières ondes.

Réactance transitoire relative à l'axe transversal : x'_q. — Définition analogue à celle de x'_d, mais pour l'axe transversal.

Réactance subtransitoire relative à l'axe direct : x''_d. — Définition analogue à celle de x'_d, mais pour la première onde du courant symétrique.

Réactance subtransitoire relative à l'axe transversal : x''_q. — Définition analogue à celle de x''_d mais pour l'axe transversal.

Réactance de séquence négative : x_2. — Rapport du terme fondamental de la chute de tension réactive de l'induit, dû à la composante fondamentale du courant de séquence négative de l'induit à cette dernière composante.

Réactance de séquence nulle : x_0. — Définition analogue à celle de x_2, mais pour le courant de séquence nulle.

Toutes les valeurs ci-dessus correspondent à la fréquence normale.

Rapport de court-circuit : Quotient du courant d'excitation donnant la tension normale à vide, par le courant d'excitation donnant le courant normal en court-circuit triphasé permanent. Ce rapport est une mesure de la rigidité de la machine.

Constante de temps à circuit ouvert, suivant l'axe direct : T'_{d_0}. — Elle est relative à la décroissance lente de la composante suivant l'axe direct de la tension de l'induit, lorsque l'inducteur est mis brusquement en court-circuit, la machine tournant à sa vitesse normale.

Constante de temps transitoire en court-circuit, suivant l'axe direct T'_d. — Elle est relative à la décroissance lente de la composante suivant l'axe direct du courant symétrique de l'induit, lorsque l'induit est mis brusquement en court-circuit triphasé, la machine tournant à sa vitesse normale.

Constantes de temps subtransitoires suivant l'axe direct : T''_{d_0} et T''_d. — Elles sont définies comme T'_{d_0} et T'_d, mais sont relatives à la partie du phénomène qui décroît très rapidement.

Constante de temps de l'induit : T_a. — Elle est relative à la composante asymétrique du courant de court-circuit de l'induit (courant continu).

Réactances.

I. — Réactances de fuites de l'induit.

Quoique cette valeur n'intéresse généralement pas les études de stabilité ni les exploitants et qu'elle ne figure pas dans les définitions standards de l'A.I.E.E., nous rappellerons cependant la formule donnée par Alger [3] qui, avec celle établie par Kilgore [4], paraît donner la valeur la plus proche de celle obtenue par essai avec rotor enlevé.

Cette réactance x_s est la différence entre la réactance synchrone x_d et la réactance de réaction d'induit dont nous appellerons x_{ad} la valeur « en unité » suivant l'axe direct. Cette dernière réactance correspond à la sinusoïde fondamentale du flux dans l'entrefer produit par les courants de l'induit seuls, c'est-à-dire à la composante stationnaire par rapport au rotor de la f.m.m. de l'induit. Le flux produit par la f.m.m. synchrone des têtes de bobine n'a qu'une faible action, au point de vue induction, sur les circuits rotoriques (surtout dans le cas de pôles saillants), aussi n'intervient-il pas dans la réactance x_{ad}, il est considéré comme un flux de fuites et rentre donc dans x_s. Cette dernière réactance comprend, comme nous allons le spécifier, les fuites d'encoches et toutes celles provenant des harmoniques de la f.m.m. en mouvement par rapport aux pôles ; elle reste la même, à très peu de chose près, pour les conditions transitoires et les conditions de régime permanent.

Dans les anciennes formules de calcul de x_s, le flux d'entrefer dû aux courants de l'induit était divisé en deux parties : l'une due à la réaction d'induit et l'autre appelée fuites par les têtes de dents.

La partie relative à la réaction d'induit devait représenter le flux d'entrefer produit par l'induit et rentrant dans l'inducteur, mais sa détermination était incorrecte. La nouvelle définition de la réaction d'induit comprend une partie du flux autrefois appelée de têtes de dents; il en résulte que les valeurs obtenues par la formule d'Alger ou celle de Kilgore sont sensiblement plus faibles que celles données par

---

(3) Alger : A.I E.E., *Transactions*, Vol. 47, août 1928, p. 433.
(4) Kilgore : *Calculation of Synchronous Machine constants Convention*, A.I.E.E., 22 juin 1931.

les anciennes formules, mais elles se rapprochent beaucoup plus de celle que fournit l'essai avec rotor enlevé.

M. ALGER décompose x_s en 4 parties :

1° La réactance de fuites d'encoches, relative aux lignes de force dues aux courants de l'induit et traversant l'encoche, mais pas à celles passant de dent à dent à travers l'entrefer. Son calcul est bien connu et sa valeur est affectée d'un coefficient K_f pour le cas de 2 bobines par encoche avec pas raccourci.

2° La réactance de fuites de têtes de bobines (due au flux entourant ces têtes seules) pour laquelle plusieurs formules ont été données (en particulier par M. ROTH).

La séparation forcément un peu arbitraire faite entre x_s et la réaction d'induit est basée sur les considérations suivantes :

On sait que la forme de la f.m.m. d'induit à un instant donné n'est pas sinusoïdale, du fait du nombre fini d'encoches et de phases ; le flux d'entrefer produit par cette f.m.m. dans une machine à pôles saillants, peut se décomposer en trois parties :

a) Une onde fondamentale sinusoïdale fixe par rapport au rotor et induisant des tensions de fréquence fondamentale, et qui constitue la réaction d'induit.

b) Une série d'harmoniques se déplaçant par rapport au rotor et induisant aussi des tensions de fréquence fondamentale. A cette série correspond une partie de x_s.

c) D'autres harmoniques en mouvement par rapport au rotor et induisant des tensions de fréquence non fondamentale dans les enroulements de l'induit ; cette partie peut être négligée.

Les fuites mentionnées au paragraphe *b* ci-dessus constituent les « fuites différentielles » ou « fuites d'entrefer » et sont dues à ce que la f.m.m. de l'induit parcouru par des courants sinusoïdaux, est différente d'une sinusoïde. ALGER les décompose elles-mêmes en 2 parties qui constituent les 2 autres termes de x_s.

3° Réactance de fuites « zig zag » qui correspond à tous les harmoniques dans l'espace du flux d'entrefer dû aux courants de l'induit pour un enroulement à une encoche par pôle et par phase. Ce terme comprend le flux passant de dent à dent à travers l'entrefer et les espaces interpolaires sans toucher la surface du rotor ; il est dû à l'écart entre la forme de f.m.m. d'induit et une sinusoïde à cause du nombre limité d'encoches.

4° La réactance « d'enchevêtrement » ou « belt leakage », qui est la

réactance supplémentaire de l'enroulement actuel par rapport à celui qui aurait autant de phases que d'encoches par pôle.

Nous donnerons simplement la formule d'ALGER dans le cas de nombre entier d'encoches par pôle et par phase [5] :

$$x_s = \frac{0,79.f.l.(2W)^2.m}{10^7.N} \left[\underbrace{K_f\left(\frac{r}{3r_1} + \frac{r_2}{r_1}\right)}_{\text{encoches}} + \underbrace{\frac{0,3(3\alpha - 1)D.N}{(2p)^2 l}}_{\text{têtes de bobines}} \right]$$

$$+ \underbrace{\frac{5}{8}\left(\frac{2p}{N}\right)^2 . x_{ad}}_{\text{zig-zag}} + \underbrace{\frac{3}{4} x_{ad}.K_B}_{\text{enchevêtrement}} \quad \text{ohms par phase} \qquad (1)$$

Le coefficient 0,79 est $\frac{8\pi^2}{100}$ et la signification des autres termes est :

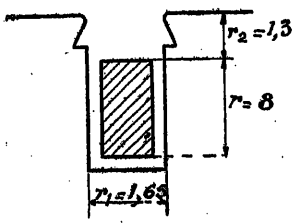


Fig. 1 — Schéma d'encoche.

f : fréquence en périodes-seconde,
l : longueur d'induit, évents compris, en cm,
D : diamètre d'alésage du stator, en cm,
$2p$: nombre des pôles,
m : nombre de phases,
W : nombre de spires en série par phase,
N : nombre total d'encoches,
r, r_1, r_2 : dimensions d'encoche en cm (voir fig. 1),
α : pas d'enroulement en fraction du pas diamétral,
K_f : coefficient de raccourcissement (voir fig. 2),
K_B : constante d'enroulement pour évaluer la réactance d'enchevêtrement (voir article d'ALGER),
x_{ad} : réactance de réaction d'induit suivant l'axe direct, en ohms par phase dans la formule (1).

Le coefficient K_B varie de 0,002 à 0,0004 pour un enroulement triphasé, avec bobinage de 60° électriques et pas d'enroulement de 50 à 100 pour cent. L'importance des 2 derniers termes de la formule (1)

---

(5) Pour les autres cas, se rapporter à l'article d'ALGER ; le dernier terme étant variable.

est faible et ils peuvent être négligés en première approximation ; leur somme varie entre 6 et 15 pour cent de x_s pour les alternateurs à vitesse lente et elle diminue avec l'augmentation de la vitesse. En évaluant la réactance en centièmes, c'est-à-dire, en exprimant en centièmes de la tension étoilée normale, la chute de tension due au passage du courant I_n dans cette réactance, le coefficient $\dfrac{0{,}79 f.l.(2W)^2 m}{10^7\ N}$ peut s'écrire :

$$X = 100 \text{ pour cent } \frac{I_n}{U_n} f.l.2p.m \cdot \frac{W^2}{p^2} \cdot (f_p.f_w)^2 10^{-8} \cdot \frac{8\pi^2}{10} \cdot \frac{2p}{N} \times \frac{1}{(f_p.f_w)^2} \cdot$$

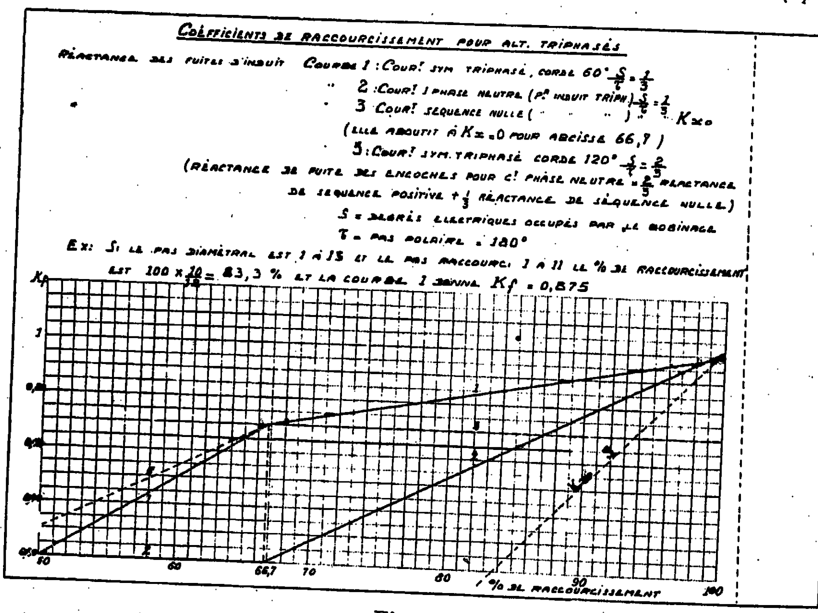


Fig. 2.

f_p est le facteur de raccourcissement : sin $(90^\circ \times \alpha)$;
f_W : le facteur de bobinage.

Or, les ampères conducteurs de périphérie d'induit sont :

$AC = \dfrac{2W.m.}{\pi D} I_n$ et le flux instantané par pôle est $\dfrac{D.l.\pi}{2p} \dfrac{2}{\pi} \cdot B_1.K_\varphi$ (6).

B_1 étant l'amplitude de l'onde sinusoïdale de B, induction dans l'entrefer.

D'autre part : $U_n = \dfrac{\pi}{\sqrt{2}} 2W.f.f_p.f_w.\Phi.10^{-8} \cdot \dfrac{1}{K_\varphi}$ volts (2)

(6) Φ étant le flux réel et $\dfrac{\Phi}{K_\varphi}$ le flux sinusoïdal donnant même tension aux bornes.

$$\text{d'où :}\quad X = 100 \text{ pour cent}\left(\frac{AC\,f_p}{B_1}\right)\left(\frac{f_w}{\sqrt{2}}\right)\frac{8\pi^2}{10}\cdot\frac{2p}{N}\cdot\frac{1}{(f_p \cdot f_w)^2}. \qquad (3)$$

La formule (3) met en évidence le terme $AC.f_p$ caractérisant la charge électrique de la machine, et B_1 mesure de l'état magnétique.

Rappelons que la réactance synchrone en ohms par phase, suivant l'axe direct est égale à $\frac{AB}{EB}$ (fig. 3), s'il n'y a pas de saturation, ce qui est le seul cas où cette réactance a une signification ; exprimée en « unité » c'est $\frac{OD}{OB}$ $\left(\text{c'est-à-dire la valeur en ohms divisée par } \frac{U_n}{I_n}\right)$.

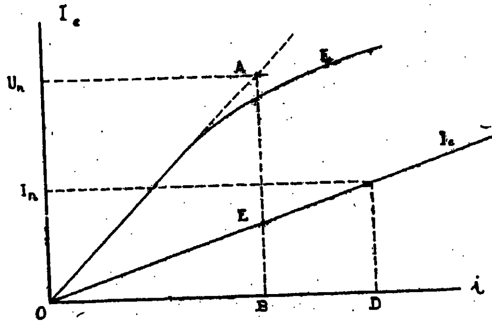


Fig. 3.

D'autre part, x_d en ohms est $L.\omega$ (inductance totale de l'induit) et la formule :

$$x_s = x_d - x_{ad} \qquad (4)$$

servant de définition à x_s (où tout est exprimé en unité) n'est autre que la formule connue : $l_2 = L_2 - M$ où l_2 est l'inductance partielle de fuites de l'induit. La séparation entre x_s et x_{ad} est évidemment assez arbitraire puisque les fuites d'un enroulement ne peuvent être considérées que par rapport à un autre enroulement, mais néanmoins elle est commode pour le calcul de la réactance transitoire.

La formule (4) permet de trouver x_s, ayant déterminé x_d par simple relevé des caractéristiques d'entrefer (ou à vide) et en court-circuit triphasé, et ayant calculé x_{ad} (inversement le calcul de x_s et de x_{ad} donnerait x_d sans essais). Ces deux façons de procéder donnent des résultats sensiblement concordants, surtout pour les alternateurs à pôles saillants. Pour les turbo-alternateurs, la formule d'ALGER donne des valeurs de x_s généralement un peu élevées.

Essai. — La méthode la plus facile à appliquer est celle avec rotor enlevé, en alimentant le stator en triphasé à fréquence normale, soit

en usine chez le constructeur, soit sur place en se servant d'un autre alternateur comme source de courant. Il faut appliquer aux valeurs trouvées, la correction de Schenkel-Roth (7) pour tenir compte du flux passant dans l'espace normalement occupé par le rotor.

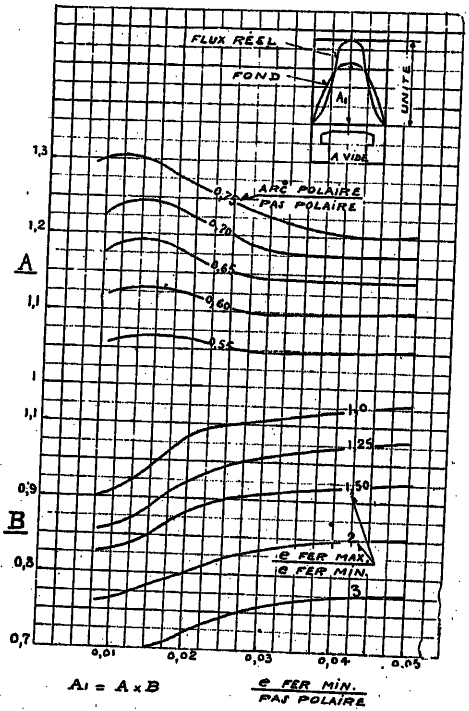


Fig. 4.

II. — Réactances de réaction d'induit.

Les ampères-tours maxima de réaction d'induit par pôle sont :

$$AT = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} . m . \frac{W}{2p} . f_w . f_p \times I_n,$$

en supposant une distribution sinusoïdale. Il faut multiplier ces AT par un coefficient K_a d'équivalence qui dépend des valeurs relatives de l'arc polaire, du pas polaire, de l'entrefer maximum (pris aux extrémités des épanouissements polaires sans tenir compte de l'arrondi) et de l'entrefer minimum (au milieu des pôles).

Les recherches de M. Wiesemann (8) ont montré que pour une machine à pôles saillants, lorsque les pièces polaires ont la forme

(7) *R. G. E.* du 7 février 1925.
(8) A. I. E. E. *Transactions*, vol. 46, page 141.

d'un arc de cercle et que l'inducteur seul est alimenté, la courbe de flux est aplatie (l'onde fondamentale étant diminuée dans l'axe par un harmonique 3).

La figure 4 donne la valeur A_1 de l'amplitude de l'onde fondamentale de flux en fraction de l'amplitude maximum du flux réel. Dans le cas où l'induit est parcouru par un courant triphasé et le rotor non alimenté, la f.m.m de l'armature étant sinusoïdale (c'est cette partie que

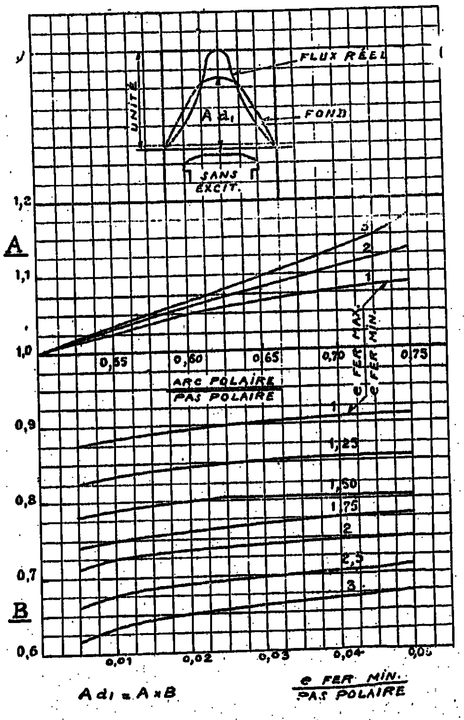


Fig. 5.

nous avons prise comme définissant la réaction d'induit) et son axe coïncidant avec celui du pôle, la figure 5 donne les valeurs de A_{d1}, ordonnée maximum de l'onde fondamentale de flux en fraction de celle du flux réel. Enfin, pour le même cas, mais pour l'axe transversal, la figure 6 donne les valeurs de A_{q1} rapport de l'ordonnée maximum de la courbe fondamentale de flux en fraction du maximum de la f.m.m. sinusoïdale de l'induit.

La valeur de K_a est alors $\frac{A_{d1}}{A_1}$; elle dépend d'ailleurs à peu près

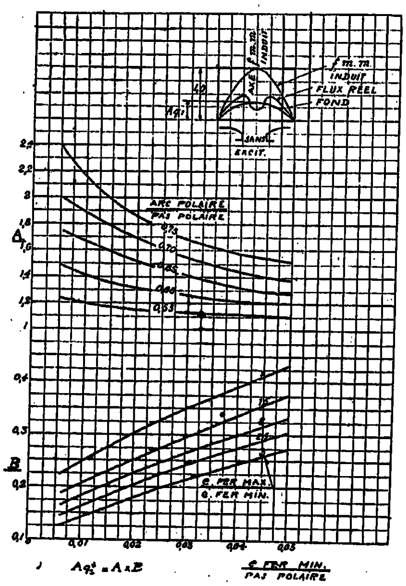

ARC POLAIRE
PAS POLAIRE
FLUX RÉEL
FOND
E FER MAX.
E FER MIN.
E FER MIN.
PAS POLAIRE

Fig. 6.

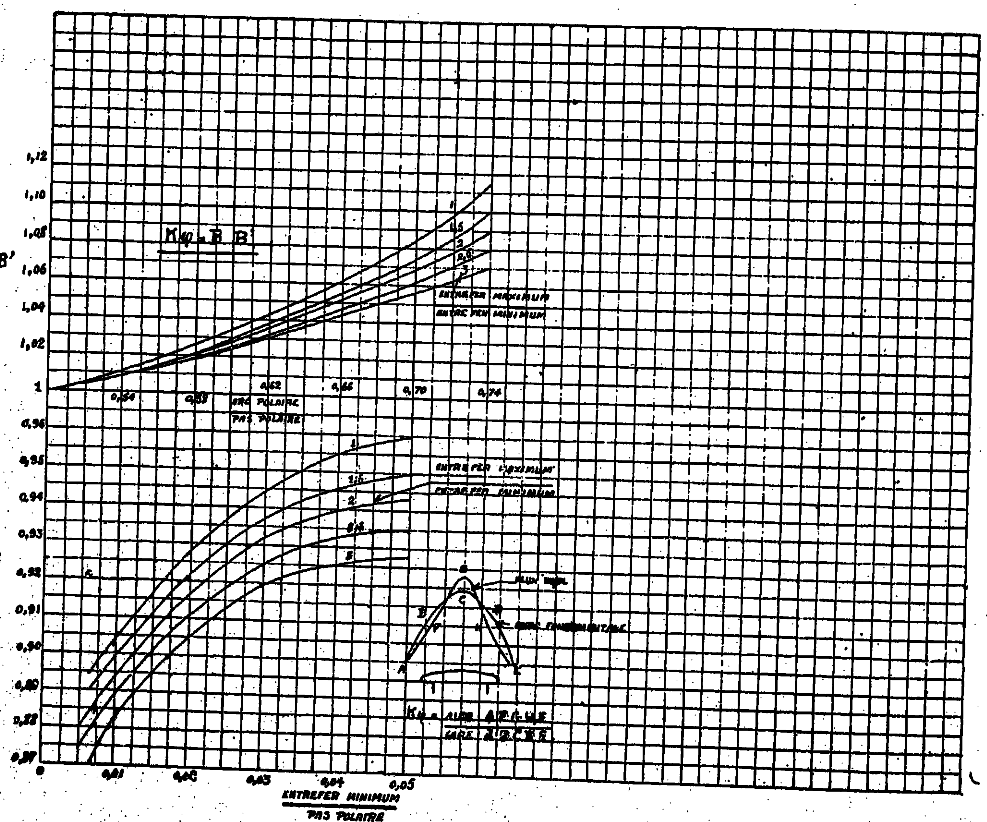

ARC POLAIRE
PAS POLAIRE
ENTREFER MAXIMUM
ENTREFER MINIMUM
ENTREFER MINIMUM
PAS POLAIRE

Fig. 7.

uniquement du rapport de l'arc polaire au pas polaire et est souvent utilisée ainsi [9].

Enfin, nous introduirons plus loin le facteur K_φ rapport du flux à vide réel au flux sinusoïdal produisant la même tension aux bornes (coefficient de distribution de flux) et dont les valeurs sont données à la figure 7.

La valeur de x_{ad} en unité est alors ;

$$x_{ad} = \frac{AT.K_a}{F} \tag{5}$$

où F sont les ampères tours par pôle correspondant à la tension normale sur la caractéristique d'entrefer (partie droite de la caractéristique à vide).

La réactance de réaction d'induit dans l'axe transversal est de même, en unité :

$$X_{aq} = \frac{AT}{F} \cdot \frac{A_{q1}}{A_1} \tag{6}$$

valeur plus faible que x_{ad}.

Rappelons que l'utilisation des coefficients A_{d1}, A_{q1} et A_1 provient de ce que nous avons appelé réaction d'induit la composante sinusoïdale du flux d'entrefer (produit par les courants de l'induit).

III. — Réactances synchrones.

La réactance synchrone suivant l'axe direct (en ne tenant pas compte de la saturation) est le quotient du terme fondamental de la chute de tension réactive dans l'induit, dû à la composante fondamentale suivant l'axe direct du courant de l'induit, par cette composante de courant, dans les conditions de régime permanent et à la fréquence normale.

De même, la réactance synchrone relative à l'axe transversal (quand il n'y a pas de saturation) est le quotient du terme fondamental de la chute de tension réactive dans l'induit, dû à la composante fondamentale suivant l'axe transversal du courant de l'induit, par cette composante de courant, dans les conditions de régime permanent et à la fréquence normale.

Pour les machines à pôles saillants, x oscille entre la valeur maximum x_d et la valeur minimum x_q.

La partie variable comprend celle de x_{ad} à x_{aq} et aussi la faible varia-

---

(9) On donne parfois la valeur d'un coefficient $K_0 = K_a \frac{2\sqrt{2}}{\pi}$.

tion de x_s (les fuites zig-zag variant dans le cours d'une période). Toutefois, nous avons supposé négligeable cette dernière cause de variation en admettant que x_s est constant.

Les valeurs de x_d et x_q peuvent être calculées en ajoutant respectivement x_{ad} et x_{aq} à x_s.

Essais. — Pour x_d, il suffit de relever les caractéristiques à vide et en court-circuit triphasé permanent. L'essai de « glissement » qui consiste à entraîner le rotor à une vitesse légèrement différente du synchronisme avec circuit inducteur ouvert en alimentant le stator en courants triphasés de fréquence normale donne ces deux réactances.

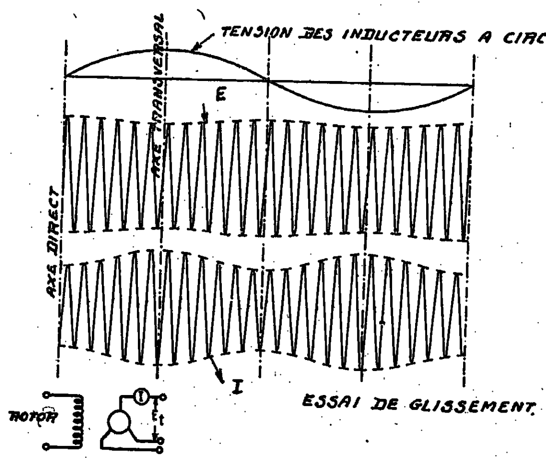


Fig. 8.

Quand la tension induite dans le circuit inducteur est nulle, on a : $x_d = \dfrac{U}{I\sqrt{3}}$ et lorsqu'elle est maximum, on obtient x_q (fig. 8). Si le glissement est très petit, on peut lire ces valeurs sans enregistrer oscillographiquement les courbes [10].

IV. — Réactances transitoires.

La réactance transitoire x'_d relative à l'axe direct est le quotient du terme fondamental de la chute de tension réactive dans l'induit, dû à la composante fondamentale suivant l'axe direct du courant symétrique de l'induit, par cette composante de courant, lorsque la charge est brusquement appliquée à la fréquence normale.

[10] M. Robertson a indiqué une méthode d'essai en utilisant du courant continu et un galvanomètre balistique (*General Electric Review*, février 1932.)

La valeur du courant est obtenue par l'extrapolation de l'enveloppe de l'onde du courant symétrique jusqu'à l'instant de l'application de la charge, en négligeant le courant décroissant très rapidement pendant les premières périodes.

La définition de x'_q est analogue. En général, comme il n'y a pas d'enroulement inducteur effectif dans l'axe transversal, $x'_q = x_q$, sauf dans le cas de rotors massifs.

Pour une meilleure compréhension de ce qui va suivre, nous avons tracé sur la figure 9 le diagramme de M. Blondel, dans le cas de non saturation, en utilisant les réactances précédentes lorsqu'il n'y a pas de circuits amortisseurs; en effet, la définition de x'_d est $\frac{e_d}{i}$ (i étant le

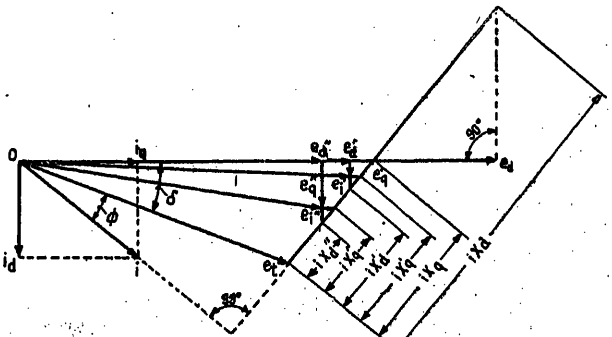


Fig. 9. — Diagramme de Blondel.

courant instantané symétrique dans l'induit et e_d étant aussi en valeur instantanée).

Or, entre 2 circuits d'inductances totales respectives L_2 et L_1 (induit et inducteur) et parcourus par des courants i_2 et i_1. on a la relation générale

$$n\Phi_r = Mi_1 + L_2 i_2 \quad \text{et} \quad \frac{\Delta n\Phi_r}{M} = \Delta i_1 + \frac{L_2}{M}\Delta i_2$$

or, la variation de e_d est proportionnelle à celle de Φ_r d'où

$$x'_d = L_2\omega - M\omega\,\frac{\Delta i_1}{\Delta i_2}.$$

D'autre part, il n'y a pas de variation instantanée du flux résultant, donc $\frac{\Delta i_1}{\Delta i_2} = \frac{M}{L_1}$ il en résulte que $x'_d = L_2\omega - \frac{M^2\omega}{L_1}$ (en ohms) et c'est la formule donnant $N_2\omega$ réactances de fuites totales rapportées à l'induit.

On sait qu'on a également $N_2 = l_2 + l_1\,\frac{M}{L_1}$.

MM. DOHERTY, SHIRLEY, PARK et ROBERTSON [11] en partant des 2 formules générales précédentes ont établi celles qui servent pratiquement aux calculs, soit en unité :

$$x'_d = x_d - \frac{A}{F.K_\varphi} \times \frac{1}{K_\varphi + F.l.L} \qquad (7)$$

où K_φ a la valeur déjà indiquée, F sont les AT d'inducteur par pôle pour la tension normale sans saturation, Φ la sinusoïde fondamentale du flux par pôle à vide et L un facteur dont la valeur est donnée plus loin avec

$$A = \frac{m}{2\sqrt{2}} \cdot f_p f_\omega \cdot \frac{W}{p} \cdot \frac{1}{K_\varphi} \cdot I_n$$

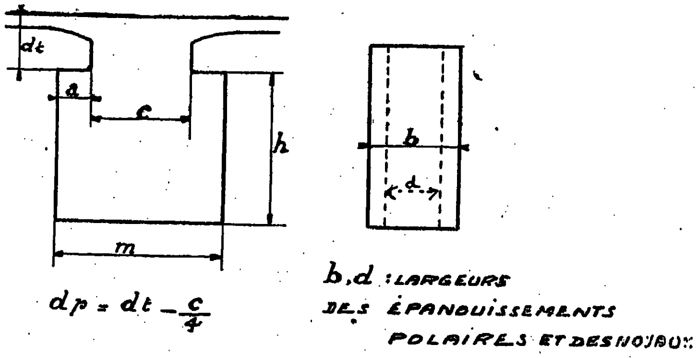


Fig. 10. — Schéma des pôles.

La seconde forme conduit à :

$$x'_d = x_s + \frac{A}{F.K_\varphi} \times \frac{\frac{FlL}{\Phi}}{\left(1 + \frac{FlL}{\Phi}\right)^2}$$

Φ étant le flux normal par pôle (formule 2).

Le facteur L a pour valeur :

$$L = 1{,}42\,\frac{h}{n} + 0{,}16\left(\frac{m}{h}\right)^5 + 1{,}6\log\left(1 + \frac{\pi a}{c}\right) + 5\,\frac{d_p}{c}\left[1 + 0{,}62\,\frac{c}{l}\log\left(1 + \frac{b\pi}{4c}\right)\right] + 0{,}55\,\frac{d}{l}. \qquad (9)$$

L'explication des signes rentrant dans L est donnée à la figure 10. Pour le calcul des fuites d'inducteur, l'ensemble des 2 premiers termes de L correspond aux fuites entre les faces latérales des noyaux et entre ces faces et le corps du rotor, le 3e à celles qui ont lieu entre les faces infé-

[11] DOHERTY « Réactance of synchronous machines » A. I. E. E., Conv. 28 juin 1918. PARK : *Synchronous Machines*. A. I. E. E., Transactions, Vol. 47, avril 1928, page 314.

rieures des cornes polaires, le 4^e^ aux fuites entre les faces latérales de ces cornes, le 5^e^ et le dernier terme représentent respectivement les fuites entre les flancs extrêmes des cornes et entre les flancs extrêmes des noyaux.

D'autres formules ont été données en particulier par MM. Mauduit, Roth et Kilgore, mais nous avons cru bon de reproduire celle de Doherty.

Essais. — 1° L'essai en court-circuit brusque triphasé donne x'_d d'après sa définition même (fig. 11).

Pour les machines à pôles saillants la valeur de x'_q, est égale à celle

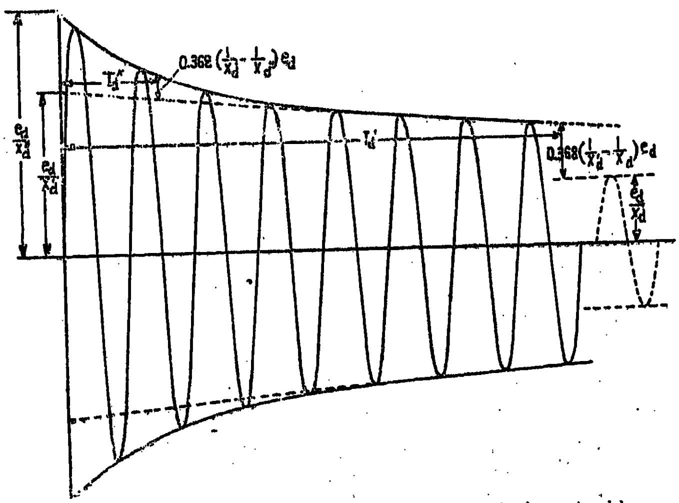


Fig. 11. — Court-circuit instantané symétrique à vide.

de x_q. Dans le cas de turbo-alternateurs, une méthode est indiquée dans le projet de standardisation américaine déjà mentionné.

2° Méthode de Potier : elle nécessite le relevé d'un point en déwatté; la réactance de Potier (également définie par les Américains) comprend, comme l'a indiqué M. Blondel les fuites de l'induit et celles qui se produisent entre les cornes polaires de l'inducteur, mais non les autres fuites de l'inducteur. Sa valeur sera comprise entre x_s et x'_d et l'écart par rapport à $x'd$ sera d'autant plus grand que la machine est moins amortie [12].

3° Dans le cas de turbo-alternateurs, ou de machines à pôles saillants avec amortisseurs, la réactance x'_d est différente de la réactance sub-

---

(12) M. Roth R.G.E. 7 février 1923.

transitoire x''_d que nous définissons plus loin, mais pour les alternateurs à pôles saillants feuilletés sans amortisseurs, ces 2 valeurs sont égales et l'essai mentionné plus loin avec rotor calé pour la mesure de x''_d donne alors x'_d.

Si la mesure est effectuée avec un courant faible, la valeur de x'_d est relative à l'absence de saturation et en multipliant ce résultat par le facteur empirique 0,88, on obtient x'_d correspondant à la saturation ([13]).

Pour les rotors massifs de turbo-alternateurs, on peut prendre approximativement $x'_q = x'd'$ et dans les autres cas $x'_q = x_q$. Plusieurs méthodes de mesure de x'_q sont indiquées par M. Wright ([14]).

V. — Réactances subtransitoires.

Leurs valeurs suivant les 2 axes : x''_d et x''_q ont une définition analogue à celle de x'_d et x'_q mais sont relatives aux premières périodes du courant symétrique de court-circuit décroissant très rapidement (fig. 11). La différence entre leurs valeurs plus faibles que x''_d et x'_q et ces dernières provient de la présence d'amortisseurs ou de circuits jouant plus ou moins complètement ce rôle (pôles massifs par exemple). Dans le cas des pôles saillants feuilletés et sans amortisseurs, x''_d et x''_q sont égales aux réactances transitoires ([15]).

Une méthode de calcul pour tenir compte de l'influence des amortisseurs est donnée par M. Kilgore dans l'article déjà cité.

Essais. — 1° Le relevé oscillographique d'un court circuit donne $x''d$

2° Essai avec rotor calé et en court-circuit : on alimente le stator par du courant monophasé entre 2 phases, la 3e restant ouverte, et le rotor

---

([13]) et ([14]) *Détermination of synchronous Machine Constants by test*, A.I E.E. Convention, 22 juin 1931.

([15]) La courbe du courant symétrique de court-circuit d'une machine en fonction du temps, se compose de plusieurs termes de constantes de temps propres différentes, soit :

$$I_s = a + be^{-\frac{t}{T_b}} + ce^{-\frac{t}{T_c}} + \ldots$$

la partie constante a, représente la valeur efficace du courant de court-circuit permanent, et comme les constantes de temps, sauf 2 d'entre elles, sont très faibles, on décompose le courant de court-circuit symétrique en 3 parties seulement, soit :

$$I_s = I_d + (I'_d - I_d)\, e^{-\frac{t}{T'd}} + (I''_d - I'_d)\, e^{-\frac{t}{T''d}}$$

où I_d est le courant permanent, I'_d la partie décroissant assez lentement (I'_d est limité par x'_d) et I''_d la partie décroissant très rapidement (due aux amortisseurs et limitée par x''_d).

La composante continue est en valeur maxima :

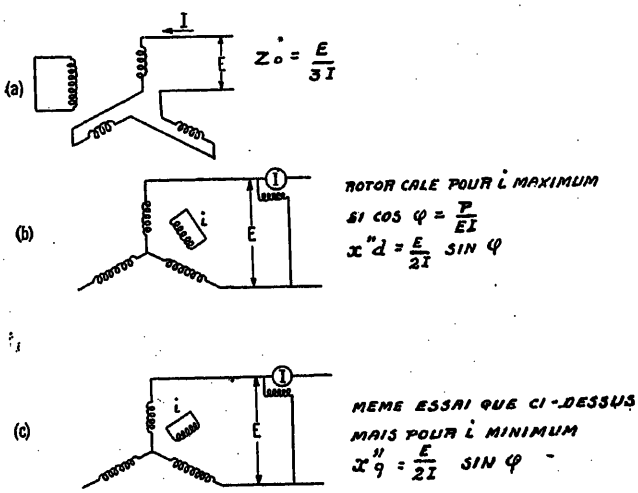
$$I_a = \sqrt{2}\,(\overline{I''_d} - \overline{I}\ \text{charge}) \quad \text{(équation vectorielle)},$$

et finalement la valeur du courant de court-circuit efficace est :

$$\sqrt{I^2_a + I^2_s}.$$

étant calé et en court-circuit. Le quotient de E par 2I donne x''_d pour la position du rotor correspondant au maximum du courant induit dans le circuit inducteur et x''_q pour la position rendant ce courant minimum (figure 12).

Toutefois, cet essai peut provoquer un échauffement exagéré des rotors de turbo-alternateurs, si le courant normal circule dans l'induit ; en faisant passer un courant de l'ordre du quart de I_n, on obtient les valeurs qui correspondent à l'absence de saturation ; d'ailleurs dans ce cas, x''_q est très voisin de x''_d.



MESURE DE Zo, x''d ET x''q

Fig. 12.

3° Méthode de M. Fallou. Pour les turbo-alternateurs et les machines à pôles saillants avec amortisseurs, la réactance de séquence négative x_2 est égale à x''_d ; par conséquent, la méthode de M. Fallou que nous indiquerons pour obtenir x_2 donne également x''_d. Dans le cas de pôles saillants feuilletés et sans amortisseurs, $x''_d \cong x'_d$ et la valeur de x_2 est supérieure à x'_d.

VI. — Réactance de séquence négative.

C'est le quotient du terme fondamental de la chute de tension réactive dans l'induit, dû à la composante fondamentale de séquence négative du courant de l'induit, par cette composante elle-même, à la fréquence normale.

La valeur de cette réactance est environ : $\frac{x''_d + x''_q}{2}$. Comme x''_d et x''_q sont très voisins pour des courants élevés et lorsqu'il y a des amortisseurs, on peut alors admettre que x_2 est égale à x''_d ; elle peut être supérieure ou inférieure à x'_d. En moyenne $\frac{x_2}{x'_d}$ est compris entre 0,5 et 1,5, la plus grande valeur correspond à l'absence d'amortissement.

Essais. — 1° *Méthode de* M. Fallou ; on relève les caractéristiques d'entrefer, en court-circuit triphasé I_3 et en court-circuit biphasé I_2. La théorie des coordonnées symétriques montre que pour une même excitation : $I_3 = \frac{E}{x_d}$ et $I_2 = \frac{E\sqrt{3}}{x_d + x_2}$ d'où on tire x_2 (E étant la tension étoilée).

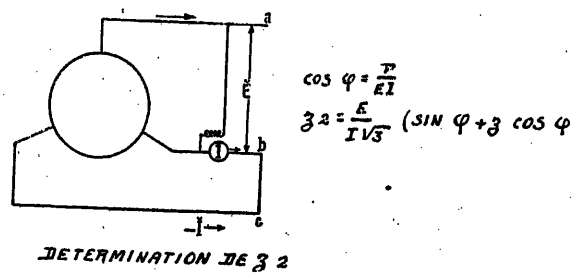


Fig. 13.

2° La machine est entraînée à sa vitesse normale, deux phases de l'induit étant en court-circuit. On relève le courant du stator, la tension entre la phase libre et les phases en court-circuit et l'indication d'un wattmètre.

Le rapport de E à $I\sqrt{3}$ donne l'impédance de séquence négative, et la réactance est obtenue en utilisant la lecture du wattmètre (fig. 13). La déformation des ondes de tension et d'intensité n'introduit pas en général d'erreur élevée, mais pour certaines machines, il est prudent de relever oscillographiquement les courbes pour effectuer une correction.

3° On met brusquement en court-circuit sur deux phases, la machine fonctionnant à vide à la tension et à la fréquence normales, on mesure la tension E à vide avant le court-circuit, ainsi que la valeur efficace initiale I'' de la composante symétrique du courant dans l'induit. On a : $x_2 = \frac{3E}{I''} - x''_d$.

On définit également la résistance de séquence négative ; les propositions standards et le rapport de M. WRIGHT indiquent la manière de la mesurer.

VII. — RÉACTANCE DE SÉQUENCE NULLE.

Sa définition est analogue à celle de x_2, mais correspond à un courant de séquence nulle. Les courants de séquence nulle ayant le même argument dans les 3 phases de l'induit, les f.m.m. fondamentales des 3 phases disparaissent et il n'y a pas de flux appréciable dans l'entrefer. Les fuites consistent dans les fuites d'encoches, les fuites différentielles et de très faibles fuites de têtes de bobines (généralement négligeables).

Avec le pas diamétral, d'après ALGER, les fuites d'encoches sont les mêmes que pour les courants de séquence positive; dans les autres cas, il donne la formule suivante :

$$x_0 = \frac{0,79f.l.(2W)^2 m}{10^7 . N}\left[\frac{(3\alpha - 2)r_2}{r_1} + \frac{(9\alpha - 5)r}{12r_1}\right]$$
$$+ 4x_{ad} \times \frac{0,5(\alpha - 2/3)}{K_a(f_p/f_w)^2}\left[\left(\frac{2p}{N}\right)^2 + \frac{1}{27} + \frac{7}{18}(\alpha - 2/3) - (\alpha - 2/3)^2\right]$$

ohms par phase.

Cette valeur varie beaucoup avec le pas d'enroulement et x_0 est compris généralement entre 0,1 et 0,8 de x''_d.

Essais. — 1° Méthode de M. FALLOU. On relève la caractéristique de court-circuit I_1, entre une phase et le neutre. On a

$$I_1 = \frac{3E}{x_d + x_2 + x_0},$$

d'où on tire x_0 si on a déterminé x_d et x_2 au moyen des essais du paragraphe précédent.

2° Le rotor étant calé et mis en court-circuit, les trois phases de l'induit sont connectées en série, on applique aux bornes de leur ensemble une tension telle que l'induit est traversé par le courant normal I, x_0 est le quotient de la tension appliquée par 3I (résistance négligeable) (fig. 12). Dans certains cas où x_0 est faible (pas d'enroulement d'environ 2/3 du pas diamétral), il est préférable de monter les 3 phases en parallèle, pour éviter d'avoir un courant élevé à une tension relativement faible.

3° Le rotor excité tournant au synchronisme, et une seule phase de l'induit étant en court-circuit, on relève le courant de court-circuit et

la tension étoilée d'une phase ouverte et on a :

$$U_1 = \frac{I_1}{\sqrt{3}} \sqrt{x^2_0 + x_0 x_2 + x^2_2},$$

d'où on extrait x_0 si on a au préalable déterminé x_2. Il est nécessaire d'effectuer un relevé oscillographique de la tension et de l'intensité, car surtout pour la première, la présence d'un important harmonique 3 fausserait le résultat si on n'effectuait pas de correction.

Les valeurs des réactances correspondant aux ondes fondamentales, les lectures des voltmètres et ampèremètres (donnant les valeurs efficaces de l'onde totale) sont à réduire dans le rapport $\sqrt{1 + m^2}$ (m étant l'amplitude de l'harmonique 3 en fraction de celle de l'onde fondamentale). L'harmonique 3 prédomine largement et il n'est pas utile en général, de considérer les autres. L'importance de la correction est cependant assez faible.

4° On établit un court-circuit deux phases et le neutre, la théorie des composantes symétriques montre qu'alors $x_0 = \frac{U}{I}$.

Cette méthode donne des courbes plus déformées que la précédente et la correction d'harmoniques est à appliquer, mais elle ne nécessite pas la connaissance de x_2 et évite ainsi de superposer les erreurs.

Constantes de temps.

I. — Constante de temps de l'induit en court-circuit : T_a.

C'est le temps en secondes qui s'écoule entre l'instant de l'application d'un court-circuit brusque et la décroissance de la composante asymétrique (courant continu) du courant de l'induit, à $\frac{1}{e}$ (ou 0,368) de sa valeur initiale.

L'inductance du stator pour le courant continu est la moyenne de x''_d et x''_q, c'est-à-dire la réactance de séquence négative x_2 et la constante de temps a donc pour valeur

$$T_a = \frac{x_2}{2\pi f . r_a} \text{ secondes,}$$

où r_a est la résistance par phase du stator.

L'ordre de grandeur de T_a est de 0,15 s ; dans le cas de turbos et de pôles saillants avec amortisseurs, elle peut être inférieure à 0,05 s, la composante de courant continu est alors négligeable après 0,10 s.

Mesures. — 1° On relève à l'oscillographe le courant du stator mis brusquement en court-circuit sur les trois phases, et on trace l'axe de symétrie de ce courant. En reportant cette courbe sur du papier à ordonnées logarithmiques, on obtient une droite, qui permet de déterminer facilement T_a.

2° Pour les alternateurs à pôles saillants, on peut faire circuler un courant continu dans 2 phases, le rotor étant entraîné à sa vitesse normale. On court-circuite ensuite les 2 phases et on mesure le temps de décroissance du courant (ou on l'enregistre).

II. — Constante de temps de l'inducteur suivant l'axe direct l'induit étant a vide : T'_{d0}.

C'est le temps en secondes nécessaire à la composante suivant l'axe direct de la tension de l'induit (valeur efficace) pour décroître jusqu'à 0,368 de sa valeur initiale, lorsque l'inducteur est brusquement mis en court-circuit, le rotor étant à sa vitesse normale (on ne tient pas compte de la décroissance très rapide des premières périodes).

Cette constante est égale au quotient de la self inductance de l'inducteur en henrys par sa résistance en ohms. Sa valeur moyenne est de l'ordre de 5 s.

Mesures. — On relève la tension à l'oscillographe et on reporte le tracé sur du papier à ordonnées logarithmiques.

III. — Constante de temps de l'inducteur suivant l'axe direct avec l'induit en court-circuit : T'_d.

Elle est définie de la même façon que précédemment, par le temps de décroissance de la valeur efficace de la composante symétrique du courant de l'induit (en négligeant la partie décroissant très vite) lorsque l'induit est mis brusquement en court-circuit triphasé.

D'après des essais, on a vu que l'on pouvait adopter pour T'_d la valeur

$$T'_d = \frac{x'_d}{x_d} T_{d0}.$$

Mesures. — On peut d'abord effectuer la mesure en relevant à l'oscillographe le courant de l'induit mis brusquement en court-circuit symétrique. On peut aussi court-circuiter soudainement les inducteurs lorsque la machine débite en court circuit triphasé permanent, environ

la moitié du courant normal ; on enregistre alors les courants de l'induit et de l'inducteur.

En multipliant la valeur obtenue par 0,88, on obtient la valeur relative à la saturation (le chiffre 0,88 provient d'une moyenne d'essais effectués).

La constante de temps T_d'' correspondant à un courant rapidement décroissant est définie d'une façon analogue et s'obtient par relevé oscillographique ; ce terme n'a de signification que dans le cas de circuits amortisseurs ou de pôles massifs. S'il n'y a pas d'amortisseurs, les rivets des pôles ou les pôles massifs interviennent pour rendre x_d'' égal à 0,85 x'_d. La valeur moyenne de T''_d est 0 05 s.

Les constantes de temps relatives à l'axe transversal sont définies et mesurées d'une manière semblable.

Application à un alternateur à pôles saillants à axe vertical :

Ses caractéristiques sont :

8 500 kVA — triphasé — $f = 50$ p : s à 187,5 t/mn

Tension normale : $U_n = 5750$ V étoilée, soit 10 000 V entre phases ;

Courant normal : $I_n = 490$;

Pôles massifs, pas d'amortisseurs ;

m (nombre de phases) $= 3$;

$2p =$ nombre de pôles $= 32$;

$l =$ (longueur d'induit, évents compris) $= 107$ cm ;

D = (Diamètre d'alésage du stator) = 390 cm ;

W (nombre de spires en série par phase) = 144 ;

N (nombre total d'encoches) = 288 ;

F (ampères tours d'inducteur par pôle correspondant à la tension normale relevée sur la caractéristique d'entrefer) = 35 spires $\times$ 190 A 6 640 A.T) ;

Φ (flux principal par pôle en maxwells) $= 18{,}9 \times 10^6$;

Pas diamétral : K_f (coefficient de raccourcissement) $= 1$,

α (pas en fraction du pas diamétral) $= 1$) ;

f_p (facteur de raccourcissement) $= \sin (90° \times \alpha) = 1$;

$$\frac{\text{entrefer maximum}}{\text{entrefer minimum}} = \frac{1{,}3}{1} ;$$

$$\frac{\text{arc polaire}}{\text{pas polaire}} = 0{,}665 ;$$

$$\frac{\text{entrefer minimum}}{\text{pas polaire}} = 0{,}026 ;$$

$A_1 = 1{,}085$ (= C_1 KILGORE);
$A_{d1} = 0{,}89$ (= C_{d1} »);
$A_{q1} = 0{,}415$ (= C_{q1} »);
$K_a = \frac{A_{d1}}{A_1} = 0{,}82$;
$K_\varphi = 0{,}987$;

La valeur des « ohms normaux » est : $\frac{5.750}{490} = 11{,}75$ ohms par phase.

I. — Réactance de fuites de l'induit seul.

Le calcul par la formule (1) donne 1,2 ohms par phase (on a pris x_{ad} égal à 8,4 ohms, le calcul de x_{ad} est donné plus loin). La répartition de l'importance des 4 termes de x_s est la suivante : 0,877 pour les encoches, 0,242 pour têtes de bobines, 0,065 pour fuites zig-zag et 0,0126 pour la réactance d'enchevêtrement (soit en pour cent de la valeur totale de x_s : 73 pour les encoches, 20,2 pour têtes de bobines, 5,5 pour réactance zig-zag et 1,08 pour le dernier terme). On voit qu'en première approximation on pourrait négliger les deux derniers termes. Exprimée en pour cent (chute de tension pour le courant normal, en pour cent de la tension normale) $x_s = 10{,}2$ pour cent ou « en unité » : 0,102.

La formule de KILGORE donne ici 11 pour cent.

On a appliqué la méthode d'essai avec rotor enlevé.

Pour 440 A on a eu une tension étoilée de 1 010 V avec une puissance triphasée absorbée de 88 kW sous cos Φ : 0,03 et courant d'excitation : 175 A. L'impédance serait donc $\frac{1\,010}{440} = 2{,}30$ ohms par phase ; la résistance fictive serait donc de 0,15 ohms et on peut admettre que l'impédance est égale à la réactance. Le flux passant d'un pôle à l'autre dans l'espace normalement occupé par le rotor est ici :

$$3{,}24 \frac{2\,W}{2p} l.I \text{ maxwells}$$

et en remplaçant l par $l + 0{,}15\tau$, on obtient pour la tension étoilée correspondant à ce flux : 445 V, soit 445/440 = 1,01 ohms par phase et finalement la valeur mesurée devient :

$$2{,}30 - 1{,}01 = 1{,}29 \text{ ohm par phase}$$

(ou 11 pour cent), valeur très voisine de celle donnée par le calcul.

II. — Réactances de réaction d'induit.

Les valeurs des coefficients de flux A_1, A_{d1} ; A_{q1} et K_a sont données plus haut, et par les formules (5) et (6) on obtient :

$x_{ad} = 71,5$ pour cent (ou 8,4 ohms par phase)

$x_{aq} = 32,7$ pour cent (ou 3,89 ohms par phase).

Les formules de Kilgore tenant compte de la modification de la valeur réelle de l'entrefer par la présence des dents de l'induit et de ses

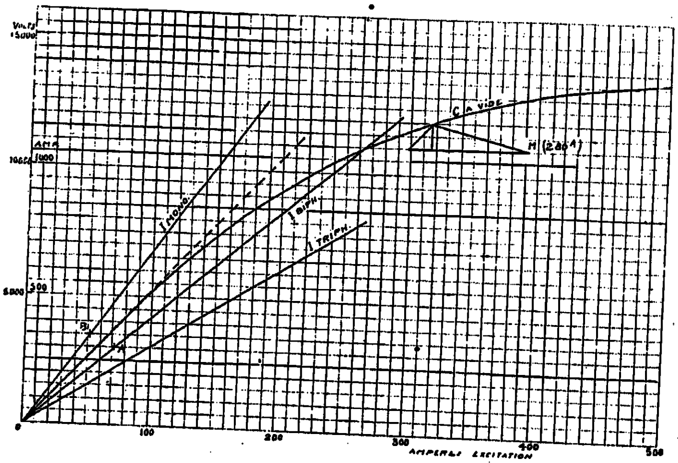


Fig. 14.

canaux de ventilation, donnent respectivement 74 et 34,5, valeurs un peu plus élevées.

III. — Réactances synchrones.

La formule $x_d = x_s + x_{ad}$ donne ici ; 81,7 pour cent (Alger) et 85 pour cent (Kilgore). De même $x_q^s = x_s + x_{aq}$ donne 42,9 ou 45,5 pour cent.

Le relevé de la caractéristique à vide et de celle en court-circuit triphasé permanent (fig. 14) donne pour la partie droite de la caractéristique à vide : $x_d = 9,6$ ohms par phase (*soit* 82 pour cent) valeur intermédiaire entre celles provenant du calcul direct.

On a effectué l'essai de glissement mentionné plus haut, avec une vitesse de rotor de 5 pour cent inférieure à celle qui correspond à la fréquence d'alimentation du stator; la tension entre phases était de 22 pour cent de la tension normale et on a relevé oscillographique-

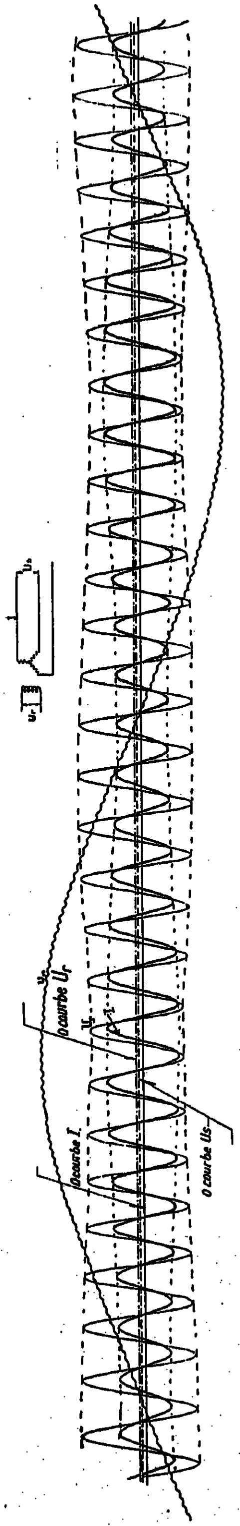


Fig. 15.

ment (fig. 15) les courbes de U, I et la tension du circuit du rotor (à circuit ouvert).

Cette dernière était de 220 V maximum ; lorsque la tension aux bornes du rotor est nulle, le quotient de U par $I\sqrt{3}$ donne x_d

$$x_d = \frac{2\,500}{151\sqrt{3}} = 9,5 \quad \text{soit 82 pour cent}$$

et lorsque la tension est maximum, on a

$$x_q = \frac{2\,110}{211\sqrt{3}} = 5,8 \text{ ohms}$$

par phase ou 49.5 pour cent. Ces valeurs sont très voisines de celles calculées.

IV. — Réactances transitoires.

La formule (8) donne *17,41* pour cent et celle de Kilgore : 25,1 pour cent (valeur « non saturée » obtenue avec un courant faible) et 22,1 pour cent pour la « valeur saturée ». La différence sensible entre ces deux résultats provient des suppositions faites pour les circuits des lignes de force des flux de fuites du rotor.

Les caractéristiques en court-circuit relevées (fig. 14) donnent 24,5 pour cent par la méthode de M. Fallou. Un point en déwatté a été relevé par couplage sur le réseau et a donné pour la réactance de fuites de Potier : 17,5 pour cent. Le coefficient d'équivalence de Potier relevé ainsi est 0,272 et celui calculé : 0,259, ce qui donne 1,05 pour le rapport de ces valeurs (valeur moyenne indiquée par M. Roth : 1,1). Rappelons que la réactance de Potier est intermédiaire entre x_s et x'_d.

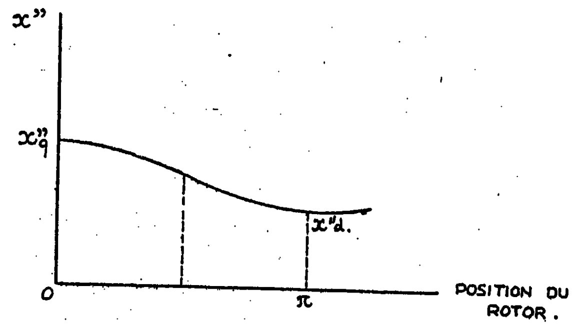
La machine essayée ne possédant pas d'amortisseurs proprement dits, mais ayant des pôles massifs, se rapproche d'une machine assez amortie comme nous le verrons plus loin par les valeurs relevées de x''_d et x''_q et la valeur

donnée par la méthode de M. Fallou est sensiblement exacte pour x''_d (puisqu'ici on tient compte de l'amortissement).

V. — Réactances subtransitoires.

Kilgore a donné des formules pour calculer les réactances subtransitoires dans le cas de circuits amortisseurs proprement dits, mais dans le cas de pôles massifs, il est difficile de définir ces circuits.

L'essai signalé avec rotor calé et en court-circuit, en faisant tourner le rotor d'un pas polaire, a été effectué et a donné les résultats suivants : pour une tension d'alimentation entre phases de 1250 à 850 V et un courant variant de 115 à 200 A (le courant dans le rotor variait de 4.5 à 17 A) on a obtenu : 3 ohms, soit 25,5 pour cent pour $x''d$ et 4,11 ohms ou 35,1 pour cent pour x''_q (cos φ étant de l'ordre de 0,3).



VARIATION DE X" (ESSAI ROTOR CALÉ).

Fig. 16.

On trouve donc pour x''_d une valeur très proche de celle de l'essai de M. Fallou et de celle obtenue pour x'_d par la formule de Kilgore. La variation de x'' suivant la position du rotor est indiquée à la fig. 16 et on voit que la différence entre x''_d et x''_q est relativement faible, signe d'assez fort amortissement de la machine.

Pour une machine non amortie, le rapport x''_q x''_d peut atteindre 2,5.

VI. — Réactance de séquence négative.

La moyenne arithmétique de x''_d et x''_q mesurée donne 30 pour cent. La méthode de M. Fallou donne 24,5 pour cent.

L'essai avec deux phases en court-circuit a fourni les résultats suivants : U = 1 500 V ; I = 292,5 A ; W = 424 kW ; cos Φ = 0,965, courant d'excitation 70 A ; on obtient donc : x_2 = 24 pour cent. La résistance r_2 serait de 0,785 ohms par phase.

VALEUR MOYENNE DES RÉACTANCES

	x_d	x_q	x'_d	x''_d	x_2	x_0	T_{d0}'	T_d'	T_a
Turbos à 2 pôles . . .	$\frac{110}{95-145}$	$\frac{107}{92-142}$	$\frac{15}{12-21}$	$\frac{9}{7-14}$	$(=x''_d)$	1 — 8	$\frac{4,4}{2,8-6,2}$	$\frac{0,6}{0,35-0,90}$	$\frac{0;09}{0,04-0,15}$
Turbos à 4 pôles . . .	$\frac{110}{100-145}$	$\frac{108}{97-142}$	$\frac{23}{20-28}$	$\frac{14}{12-17}$	$(=x''_d)$	1,5 — 14	$\frac{6,2}{4-9,2}$	$\frac{1,3}{0,8-1,8}$	$\frac{0,2}{0,15-0,35}$
Alternateurs à pôles saillants et moteurs (avec amortisseur). .	$\frac{110}{60-145}$	$\frac{75}{40-100}$	$\frac{37}{20-50}$	$\frac{24}{13-35}$	$\frac{24}{13-35}$	2 — 20	$\frac{5,6}{1,5-9,5}$	$\frac{1,8}{0,5-5,3}$	$\frac{0,15}{0,03-0,25}$
Alternateurs à pôles saillants (sans amortisseur)	$\frac{115}{60-145}$	$\frac{75}{40-95}$	$\frac{35}{20-45}$	$(=x'_d)$	$\frac{55}{30-70}$	4 — 25	$\frac{6,6}{3-10,5}$	$\frac{2}{1-3,3}$	$\frac{0,30}{0,1-0,5}$
Compensateurs synchrones.	$\frac{180}{150-220}$	$\frac{115}{95-140}$	$\frac{40}{30-60}$	$\frac{25}{18-38}$	$\frac{24}{17-37}$	2 — 15	$\frac{9}{6-11,5}$	$\frac{2}{1,2-2,8}$	$\frac{0,17}{0,1-0,3}$

Les réactances sont exprimées en pour cent des ohms normaux et les constantes de temps en secondes.

Pour les valeurs exprimées sous la forme $\frac{110}{35-145}$, le chiffre supérieur donne la valeur moyenne et les deux nombres inférieurs, les valeurs extrêmes.

VII. — Réactance de séquence nulle.

Le calcul par la formule d'Alger donne 11,4 pour cent; la méthode de M. Fallou : 9,35 pour cent. L'essai en court circuit phase-neutre a donné : $U_1 = 750$ V pour $I_1 = 348$ A d'où $x_0 = 11,6$ pour cent. La fig. 17 reproduit les relevés oscillographiques de U et de I; on remarque que pour U, l'harmonique 3 est de 16,5 pour cent de l'onde fondamentale avec un décalage de 159°, tandis que pour I, il est plus faible. La correction à effectuer de ce fait ramène x_0 à 11,4 pour cent, elle est donc peu importante.

Avec l'essai de court-circuit entre deux phases et le neutre, on a eu : U = 750 V, pour I = 480 A soit $x_0 = 1,56$ ohms.

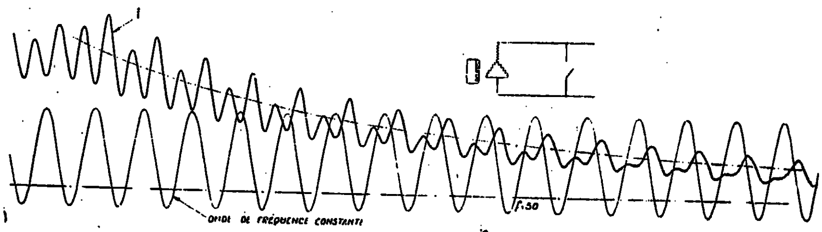


Fig. 20.

La figure 18 montre les relevés oscillographiques de U et de I avec un harmonique 3 de 40 pour cent et un harmonique 5 de 1,5 pour cent pour I; la valeur corrigée est 13,8 pour cent.

Enfin, on a réuni les 3 phases en série et on a alimenté sous 950 V avec un courant de 152 A d'où U/3I = 2,07 ohms, soit 17,6 pour cent, les courbes relevées sont représentées à la fig. 19 (le rotor était calé et en court-circuit, et la puissance absorbée était de 25 kW).

VIII. — Constantes de temps.

Par le calcul on a : $T_{0d'} = 2,88$ et $T_{d'} = 0,625$ s T_a : 0,094 s.

Pour mesurer cette dernière constante on alimente le stator en courant continu entre 1 phase et les deux autres réunies en parallèle, (le rotor étant ouvert) puis on court-circuite le stator et on relève oscillographiquement la décroissance du courant.

On a eu pour 10 V d'alimentation un courant initial de 43,5 A, la mesure du nombre de périodes témoin pour atteindre 0,368 de la valeur initiale donne T_a, qui est ici de 0,1 seconde (valeur proche de celle calculée). La fig. 20 reproduit la courbe relevée.

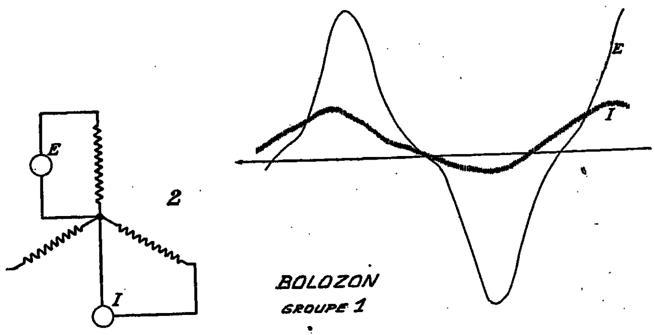


Fig. 17.

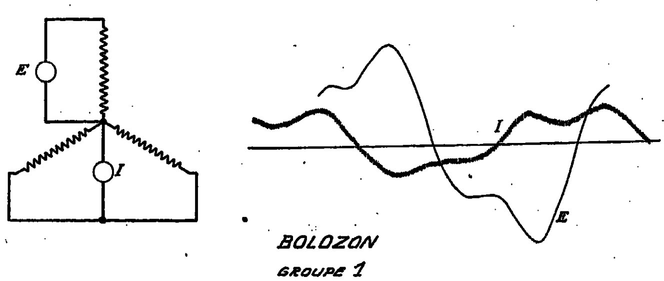


Fig. 18.

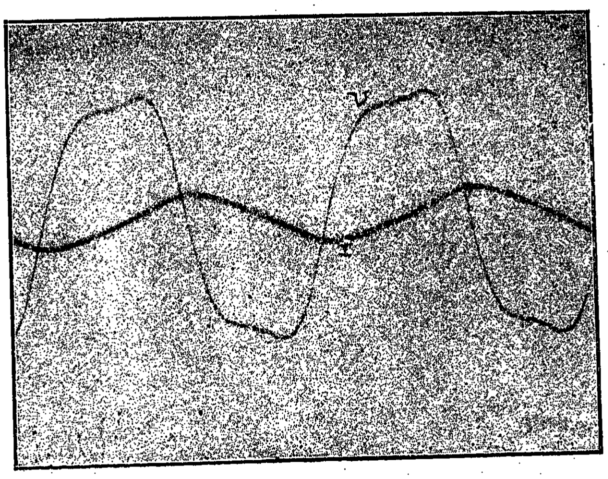


Fig. 19. — Mesure de x_0.
U = 950 V, I = 152 A.

Conclusions

Bien que la machine essayée ait présenté un amortissement moyen assez peu défini, nous avons pensé que les méthodes d'essai proposées comme Standards par l'A.I.E.E. pourraient donner des conclusions intéressantes quant aux formules à appliquer. Nous nous proposons d'ailleurs de continuer ces essais sur des alternateurs de différents types.

On peut, je pense, conclure à l'exactitude suffisante pour les besoins des exploitants, des dernières formules américaines proposées et (en première approximation) d'après un grand nombre de mesures faites par les ingénieurs de la Westinghouse C°, on peut utiliser le tableau ci-joint.

LES APPLICATIONS DES TUBES A EFFLUVES (1).

par MAURICE LEBLANC.

En dehors de leur utilisation dans l'éclairage (publicité lumineuse, signalisation ou balisage, éclairage décoratif), dont nous ne nous occuperons pas dans ce rapport, les tubes à décharge électrique par effluve dans un gaz raréfié ont reçu depuis quelques années un certain nombre d'autres applications que nous nous proposons de décrire.

1° *Caractéristiques de la décharge par effluve.*

Nous rappellerons tout d'abord rapidement les caractéristiques de la décharge dans les tubes à effluve qui justifieront les divers emplois de ceux-ci.

Si on applique entre les électrodes d'un tube à gaz raréfié (pression

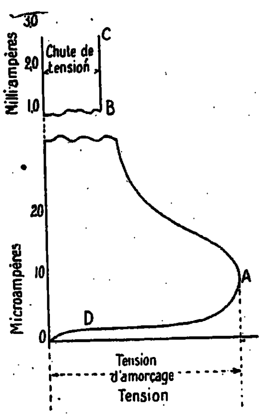


Fig. 1.

1 à 30 mm) une tension électrique croissante, on constate en premier lieu que les électrons ou les ions qui existent toujours dans le gaz (environ 100 par cm^3), se dirigent sous l'influence du champ électrique ainsi créé vers les électrodes en donnant lieu à un courant de l'ordre du microampère qui varie peu avec la tension (portion = DA de la

(1) Ce rapport sera discuté à la semaine de discussions de novembre 1932 de la Société française des Electriciens.

courbe de la fig. 1) : c'est le courant de saturation correspondant à la formation spontanée des ions dans le gaz (attribuée à une radiation ultra-pénétrante).

Si on continue à élever la tension, une décharge lumineuse se produit brusquement pour une certaine valeur déterminée (potentiel disruptif). Un régime de décharge stable s'établit, dans lequel la tension aux bornes du tube reste sensiblement constante pour de grandes variations du courant (portion BC de la courbe précédente).

La décharge disruptive s'établit au moment où les électrons qui, grâce à leur faible masse, acquièrent dans le champ électrique entre électrodes une vitesse beaucoup plus grande que les ions, ont atteint une énergie cinétique suffisante pour ioniser par choc les atomes du gaz.

Examinons les phénomènes qui se passent, d'une part au voisinage des électrodes et, d'autre part, dans l'espace lumineux ou colonne positive qui les sépare. Dans cet espace règne un état d'équilibre tel, que le nombre des porteurs de charge formés par ionisation par choc et qui dépend du gradient de potentiel, compense exactement ceux qui disparaissent par recombinaison, particulièrement active sur la paroi de l'enveloppe.

Le voisinage de la cathode, par suite du transport du courant, s'appauvrit constamment en électrons qui, si la décharge subsiste, doivent y être nécessairement produits à nouveau. On constate l'existence, au voisinage immédiat de cette électrode, d'une chute de potentiel appelée chute cathodique dans laquelle les ions positifs s'accélèrent et acquièrent une force vive suffisante pour venir arracher par choc des électrons aux atomes de la cathode.

Sur la cathode se développe une lueur, dite lueur cathodique, qui en recouvre une partie d'autant plus grande que le courant émis est lui-même plus grand.

Dans les appareils que nous étudierons, les deux électrodes sont très rapprochées, l'anode est généralement plongée dans la lueur cathodique et la chute de potentiel entre bornes du tube est pratiquement réduite à la chute cathodique, d'où l'importance de la grandeur de celle-ci.

On constate qu'elle varie, dans de très larges limites, avec la nature du métal de la cathode et celle du gaz de remplissage comme le montrent les quelques exemples ci-après.

Métal de la cathode	Gaz	Chute cathodique en volts
Fer	Vapeur de mercure	389
Calcium	Argon	64
Fer	Néon-hélium	140
Potassium	—	70

Tant que la lueur cathodique ne recouvre pas toute la cathode, c'est-à-dire tant que le courant ne dépasse pas une certaine valeur, la chute cathodique reste indépendante du courant, elle est dite « chute cathodique normale » ; lorsqu'elle la recouvre entièrement, la chute cathodique croît avec le courant.

Nous avons dit que l'effluve s'amorçait pour une certaine tension dite « tension d'amorçage ». Si on diminue ensuite la tension appliquée, l'effluve ne s'éteint pas immédiatement, il reste d'abord généralement suffisamment d'électrons pour l'entretenir. Ce n'est que si leur densité tombe au-dessous d'une certaine valeur que la décharge cesse, ceci se produit quand la tension tombe elle-même au-dessous d'une certaine valeur critique, « tension de désamorçage » ; qui dépend de la pression et de la nature du gaz, de la forme des électrodes, etc. Si le courant n'est pas limité par une résistance placée en série, l'effluve peut se transformer en arc par suite de l'échauffement de la cathode. Ceci se produit toujours quand la pression du gaz est suffisante au-dessus d'une certaine valeur du courant. Les tubes à effluve du commerce sont généralement remplis d'un gaz rare, néon, argon ou le plus souvent d'un mélange néon-hélium. Ces gaz ont été choisis, d'abord à cause de leur inactivité chimique qui supprime toute combinaison avec les électrodes et, par suite, la cause principale de disparition du gaz, cause elle-même du durcissement du tube. D'autre part, il est possible d'y amorcer et d'y entretenir la décharge avec des tensions plus faibles que dans les gaz usuels ; ils sont, en effet, dépourvus d'affinité électronique et les électrons y demeurent libres sous des pressions plus élevées et pour des champs plus faibles que dans les gaz usuels.

2° — *Lampes veilleuses du commerce.*

On trouve, dans le commerce, des lampes à néon de forme analogue aux lampes à incandescence (OSRAM, SIEMENS) (fig. 2) qui fonctionnent sur les tensions normales de réseau 110 ou 220 V et qui émettent une pâle lumière orangée en consommant une puissance électrique très faible, de l'ordre de 4 W. Dans ces lampes, les électrodes sont

assez rapprochées pour que la colonne positive ait disparu et seule la lueur étalée à la surface de la cathode est visible Si la lampe fonctionne sur courant alternatif, les deux électrodes ont le même aspect.

Pour permettre à la décharge de s'amorcer sous une aussi faible différence de potentiel, les électrodes sont en fer recouvertes d'un métal alcalin ou alcalino-terreux.

L'amorçage se produit pour une tension de l'ordre de 90 V.; une résistance de 1500 ohms est logée dans le culot de la lampe; le courant, lorsque la lampe fonctionne sur 110 V, est d'environ 25×10^{-3} A.

Ces lampes sont destinées à la publicité lumineuse, soit que des

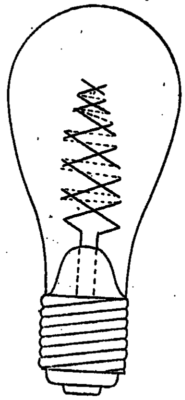


Fig. 2.

lettres (une par lampe) soient tracées en peinture opaque sur l'enveloppe de verre, soit que la cathode elle-même soit faite d'une plaque métallique découpée en forme de lettre. Elles peuvent aussi, par suite de leur faible consommation, servir comme lampes veilleuses ou de signalisation.

3° *Redresseurs.*

L'emploi de la lampe comme redresseur est fondé sur cette propriété de la décharge par effluve que la chute cathodique demeure constante tant que la densité de courant à la surface de la cathode ne dépasse pas une certaine valeur et croît ensuite.

Si le tube possède deux électrodes de dimensions très différentes et si, lorsqu'on l'alimente par une force électromotrice alternative, le courant limite est dépassé pour la plus petite de ses électrodes, on constate que le courant qui le traverse est plus petit pendant l'alternance pour laquelle la plus petite électrode est cathode. Si cette électrode est suffi-

samment petite, ce courant inverse pourra lui-même être très petit et le tube constituera un redresseur dont le facteur de redressement sera bon, mais qui n'aura un rendement appréciable que pour des tensions déjà élevées, la chute de tension dans le sens perméable étant de l'ordre de 80 V.

La cathode est constituée, par exemple, par un cylindre en fer pour les tensions à redresser de l'ordre de 220 V ou en fer recouvert d'un alliage de sodium et de potassium liquide à la température ordinaire pour les tensions de 110 V. L'anode est un fil de fer placé dans l'axe du cylindre et recouvert d'une gaine de porcelaine de manière qu'un point seul soit découvert dans le milieu du cylindre. Un tel appareil convient pour des courants jusqu'à 0,2 A.

4° *Stabilisateurs de tension.*

L'emploi de la lampe au néon comme stabilisateur de tension est basé sur la constance de la différence de potentiel entre ses électrodes

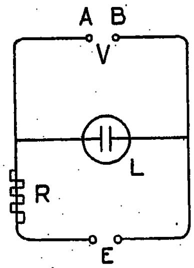


Fig. 3.

pour une grande variation du courant, tant que celui-ci ne dépasse pas une certaine valeur (passage à la chute de tension cathodique anormale).

Soit (fig. 3), une source « E » dont la tension est variable et à l'aide de laquelle on veut obtenir entre deux bornes « A » et « B » une tension « V » constante. On place en dérivation entre les points « A » et « B » une lampe à effluve « L » Si celle-ci est amorcée et si la tension de « E » ne dépasse pas une valeur telle que le courant limite dans la lampe soit atteint ou ne tombe pas au-dessous de la tension de désamorçage de la lampe, la tension entre les points « A » et « B » reste constante et égale à celle aux bornes de la lampe.

La lampe à néon a été fréquemment utilisée à cet usage en T.S.F. où la tension régularisée, d'environ 80 V, qu'elle permet d'obtenir, a

été pendant longtemps la tension normale d'alimentation des plaques de lampes triodes. On peut d'ailleurs obtenir une tension plus élevée, multiple de 80 V, en utilisant plusieurs lampes en série.

La Maison LORENZ a même construit des stabilisateurs à plusieurs électrodes (fig. 4 et 5), dont chacun permet d'obtenir une série de tensions stabilisées multiples de 70 V.

5° — *Relais.*

L'emploi de la lampe au néon comme relais est basé sur la fixité de la tension d'amorçage d'une lampe donnée. La lampe « L » est (fig. 6), placée en série avec une source auxiliaire « E » dont la ten-

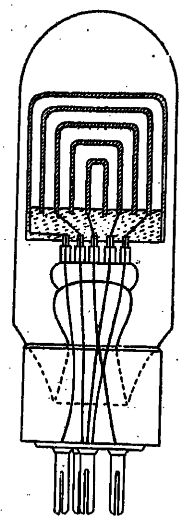


Fig. 4.

sion est inférieure, mais très voisine, de la tension d'amorçage ; on peut provoquer celui-ci par une très faible augmentation de tension « *e* » produite par le phénomène à déceler par l'intermédiaire d'un transformateur « T », on peut utiliser dans la décharge électrique, soit la lumière produite, soit le courant relativement important qui la traverse, pour produire par exemple le fonctionnement d'un relais « R ».

On peut, de même, sensibiliser la lampe à l'extinction en la plaçant à l'aide d'une source auxiliaire sous une tension légèrement supérieure à la tension de désamorçage, une sous-tension provoquant l'extinction.

D'une lampe du commerce à l'autre, la tension d'amorçage peut varier d'une dizaine de volts ; pour une lampe donnée, elle reste cons-

tante à un dixième de volt près, pendant de longs intervalles de temps à condition que les allumages successifs ne soient pas si rapprochés que l'ionisation qui persiste à la suite d'une extinction ait eu le temps de disparaître. Le passage du plein soleil à l'obscurité augmente la tension d'amorçage d'environ 4 V par suite de la disparition de l'effet pho-

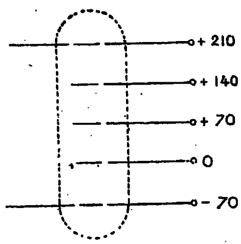


Fig. 5.

toélectrique sur les électrodes. La lumière du jour donne un courant photoélectrique de l'ordre de 5 à 6 μA, on peut, en utilisant la chute de tension qu'il donne dans une résistance, faire que la lampe s'allume d'elle-même si on provoque l'obscurité. Les lampes utilisées comme relais doivent donc être protégées de la lumière.

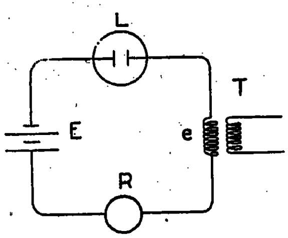


Fig. 6.

Si la tension appliquée à la lampe est nettement plus grande que la tension d'amorçage, l'amorçage se produit avec un retard insignifiant, plus petit par exemple que $1/10^3$ seconde. Si l'écart diminue, les retards peuvent devenir importants, surtout si la lampe est dans l'obscurité.

Ce dispositif a été en particulier utilisé par la Société de condensation et d'applications mécaniques (Brevet Touly n° 628045), pour mettre en évidence le retour des faibles échos ultra-sonores dans le sondage par ultra-sons, procédés Langevin-Chilowski.

6° — *Relais à grille.*

On peut rajouter dans le tube une troisième électrode ou grille. H. Brown décrit dans *Radio News* de juin 1932 un tube dans lequel

l'anode est un fil qui, partant du pied, s'élève verticalement dans le tube. A l'exception de l'extrémité de ce fil qui est de petite surface, l'anode est complètement enveloppée par un tube de verre scellé au pied. La grille est aussi un fil qui s'élève verticalement, parallèle à l'anode, mais courbé à son extrémité de manière à s'étendre au-dessus de l'extrémité libre de l'anode dont elle est très près.

Elle est aussi recouverte par un tube de verre sur la plus grande partie de sa portion libre. Le cathode est un cylindre métallique qui enveloppe la grille et l'anode (figure 7).

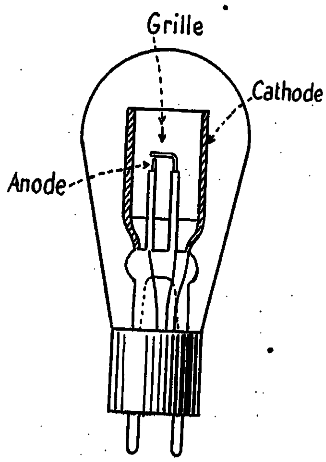


Fig. 7.

Tant que la grille est isolée, il est impossible de déterminer un amorçage, même pour des tensions aussi élevées que 900 V.

Pour permettre à la grille de perdre sa charge négative, il suffit de la réunir à l'anode à travers une très haute résistance. Quand le tube est allumé, la grille n'a plus aucun contrôle sur le courant et n'arrête pas la décharge si négative qu'elle puisse être; il est nécessaire d'ouvrir le circuit pour arrêter la décharge. En courant alternatif, la décharge est coupée automatiquement vers la fin de chaque alternance quand la valeur instantanée de la tension alternative devient inférieure à la tension aux bornes du tube. Pour cette raison, le tube à effluve à grille n'est pratiquement utilisable que sur un courant alternatif. La figure 8 représente un schéma d'utilisation d'un relais à effluve à grille.

7° *Générateur d'oscillations à basse fréquence.*

L'emploi du tube à effluve pour l'amorçage d'oscillations électriques

de relaxation est basé sur sa propriété de s'amorcer et de se désamorcer pour deux valeurs bien déterminées de la tension aux bornes.

Si on place une résistance élevée (10 000 à 100 000 ohms), dans le circuit du tube à effluve et un condensateur en parallèle entre ses bornes, le condensateur se charge jusqu'au moment où il atteint la tension d'amorçage du tube. L'effluve s'amorce et décharge le condensateur jusqu'à la tension de désamorçage de l'effluve. Le condensateur se recharge alors. La fréquence des décharges diminue quand la valeur de la résistance et de la capacité s'élèvent. Il est assez difficile d'obtenir une fréquence élevée parce que, si on cherche à l'augmenter par augmentation du courant de charge du condensateur, au delà d'une certaine valeur, un amorçage permanent en courant continu se produit dans le tube. La plupart des expérimentateurs n'ont pu dépasser la fréquence 5 000 p: s, cependant Demontvignier et Touly (voir bulletin de la S.F.E. mai 1930) par une étude spéciale de l'oscillateur, ont pu atteindre la fréquence 50 000 p: s. Le tube à effluves qu'ils utilisent est rempli d'argon pur sous une pression déterminée, la tension d'amorçage est d'environ 250 V et la tension de désamorçage de 90 V plus faible.

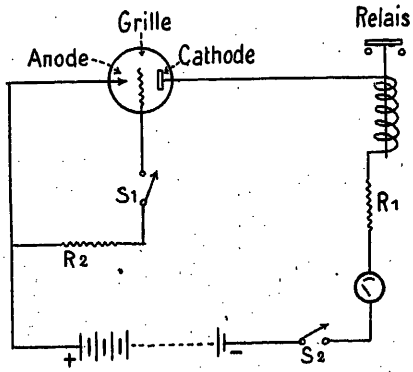


Fig. 8.

8° *Parafoudres.*

L'emploi des tubes à effluves comme parafoudres est basé sur les propriétés suivantes qui sont celles d'un bon parafoudre :

Tension d'amorçage bien déterminée et reprenant rapidement la même valeur aussitôt après le désamorçage.

Faible chute de tension intérieure en fonctionnement.

Pas de retard à l'amorçage permettant à la surtension de prendre des valeurs dangereuses.

Possibilité d'écouler rapidement des charges électriques importantes. La tension d'amorçage exigée de ces appareils varie avec leurs applications : 250 V continus pour les réseaux de signalisation de chemin de fer, 400 V pour la protection des réseaux téléphoniques, afin

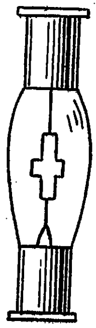


Fig. 9.
(Hewittic)

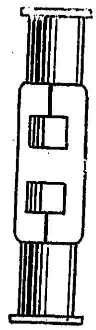


Fig. 10.
(Lutèce)

de rendre moins fréquents le passage de la décharge et par suite les chocs acoustiques. Cette différence de tension est généralement obtenue en faisant varier la distance des électrodes : on ne peut obtenir celle-ci par variation de la pression; si cette dernière est très basse, l'effluve

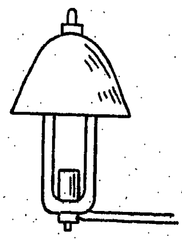


Fig. 11.

risque de ne pas se transformer en arc et de ne pas permettre un écoulement assez rapide de la surtension; si la pression est trop élevée on observe des retards à l'amorçage.

Si, d'autre part, on fait varier la pression dans des limites restreintes, de 15 à 40 mm par exemple, on constate que la loi de Paschen ne s'applique pas pour ces électrodes qui sont proches et dont les surfaces en regard ont des formes compliquées. Aux divers gaz rares, hélium, argon, néon, correspondent des tensions d'amorçage du même ordre

de grandeur, celle de l'hydrogène est plus élevée, mais varie après fonctionnement, par suite probablement d'une action du gaz sur la matière des électrodes.

Le parafoudre à effluve est à recommander pour la protection des circuits dans lesquels aucun courant ne peut suivre l'impulsion, soit que la tension du réseau soit faible, soit même qu'elle soit nulle; les antennes de T.S.F., les circuits télégraphiques, téléphoniques ou de signalisation sont de ce type.

Les figures 9, 10, 11, représentent un certain nombre de types de parafoudres à effluve du commerce.

8° *Source lumineuse pour la télévision.*

L'emploi de la lampe à effluve en télévision est basé sur le fait que l'intensité lumineuse suit avec fidélité la variation du courant avec un

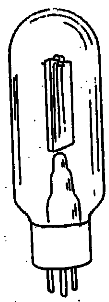


Fig. 12.

retard de l'ordre de 10^{-5} seconde, ce qu'aucune autre source de lumière ne permet d'obtenir.

Lorsque le procédé de télévision utilise le disque de Nipkow, il est nécessaire de réaliser une surface lumineuse de brillance uniforme et d'étendue égale à l'image qu'on veut obtenir.

Ceci est obtenu en utilisant, soit la lueur cathodique, soit la colonne positive. Comme exemple du premier cas, nous pouvons citer la lampe Philips (fig. 12) dont la cathode est une plaque de 35 × 50 mm et l'autre électrode un rectangle unifilaire situé au voisinage de la cathode. La plaque doit toujours être recouverte de lumière, le courant ne doit donc pas descendre au-dessous d'une certaine valeur critique qui est de 4 mA. Le courant normal est réglé à 20 mA environ, de sorte que le maximum d'amplitude de variation du courant peut être $20 - 4 = 16$ mA, le courant dans la lampe varie donc de 4 à 36 mA.

Certaines de ces lampes consomment 0,6 W sous 160 V; la face arrière de la cathode est recouverte d'une substance isolante afin de limiter la luminescence à un côté de la plaque. Comme exemple d'utilisation de la colonne positive, nous citerons la lampe en zig-zag du professeur LUTHAUSER (fig. 13) qui a le désavantage de ne pouvoir

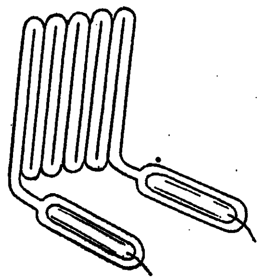


Fig. 13.

fonctionner que sur tension très élevée, mais qui donne une lumière blanc bleuâtre grâce à l'emploi d'argon et de mercure. La figure 14 donne le schéma d'utilisation de ces lampes. Dans le circuit anodique de la dernière lampe de puissance de l'amplificateur, se trouve une self

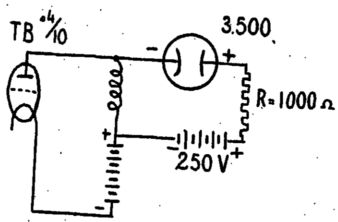


Fig. 14.

inductance ou une résistance telle que, pour des tensions de grille de même amplitude, (fréquences entre 5000 et 10000 p : s) les mêmes tensions soient développées à ses bornes. La lampe de télévision est alimentée par une batterie de 250 V, le courant est limité par une résistance de 1000 ohms aux environs de 20 mA.

D'autres procédés de télévision qui utilisent, par exemple, le disque à miroirs de WEILLER exigent une source ponctuelle. On la réalise à l'aide d'une lampe à cathode creuse formée par un cylindre dont la surface externe est isolée. L'anode a la forme d'une calotte en fer et on ne voit la lumière provenant de l'effluve qu'en regardant dans le sens longitudinal à travers l'ouverture de cette calotte. Cette forme de lampe possède un rendement lumineux bien supérieur à celui de la lampe à

cathode plane dans laquelle, à chaque variation de courant, toute la surface de l'électrode atteint l'intensité lumineuse désirée alors que c'est seulement la lumière émise par un point de cette source qui est utilisée, tandis que dans les lampes à cathode creuse, il n'y a qu'un point lumineux qui subit la variation d'intensité.

Dans un autre modèle de lampe (fig. 15) inspiré par le Dr. SCHROTER et réalisé par le Dr. EWEST dans les laboratoires OSRAM, on utilise la colonne positive rétrécie. L'anneau visible sur la figure représente l'anode, la cathode n'est pas visible. elle est à l'intérieur d'un grand cylindre isolé par rapport aux deux électrodes et qui porte un petit ajustage cy-

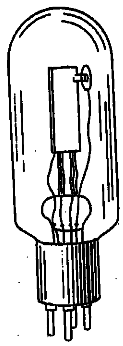


Fig. 15.

lindrique latéral. C'est à travers ce dernier que l'effluve passe entre anode et cathode, elle est limitée à un point lumineux de 2,5 mm de diamètre environ. Dans les conditions ordinaires de la décharge par effluve, ce genre de lampe nécessite des tensions beaucoup plus élevées que les lampes à cathode creuse, mais comme la lueur cathodique n'est pas tout utilisée, on peut complètement éliminer la chute de tension cathodique par une cathode incandescente et diminuer ainsi, dans une certaine mesure, la tension d'alimentation.

Une partie des renseignements qui précèdent est empruntée à une étude du Dr F. MICHELSSEN parue dans Funk Bastler du 30 janvier 1931.

PROGRÈS DANS LA FABRICATION ET LES APPLICATIONS DES INTERRUPTEURS A MERCURE (1)

par M. André Léauté.

Cette communication fait suite à celle qui, en 1925, a paru dans le Bulletin. A cette époque, la technique exclusivement adoptée dans la fabrication décrite (2) consistait à associer des entrées de courant en tungstène et des ampoules en Pyrex : l'étanchéité ainsi obtenue, combinée avec la pureté du mercure et de l'hydrogène utilisés, avaient permis de fabriquer des interrupteurs de puissance bien plus grande que précédemment.

Depuis lors, des progrès ont été faits dans deux voies. D'une part, on a perfectionné la technique des interrupteurs pyrex-tungstène ; d'autre part, on a créé une technique nouvelle, qui, dans certains cas, est plus avantageuse.

I. Perfectionnement de la technique pyrex-tungstène

Si, pour les interrupteurs de puissance, la technique initiale garde toute sa valeur, un inconvénient, celui de la trop grande résistance

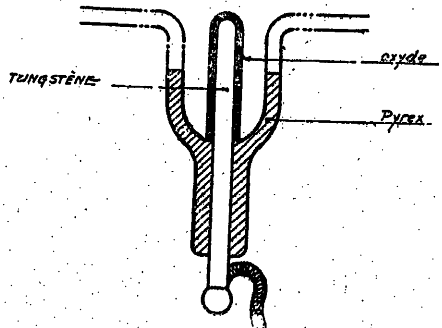


Fig. 1. — Electrode en tungstène non platiné montrant le dépôt d'oxyde.

interne, se révèle quand on opère sur une distribution à tension très faible.

C'est le cas, très important, des circuits de signalisation.

(1) Communication présentée à la réunion du 10 mai 1932 de la 4e Section du Comité d'Administration de la Société française des Electriciens.

(2) *Bulletin de la Société française des Electriciens* : 4e Série, Tome V, janvier 1925, p. 13.

A froid, la résistance interne d'un interrupteur peut atteindre 10^{-1} ohm. Sur un circuit de pile ou d'accumulateur (chemins de fer), cette valeur est prohibitive.

Pour la réduire, on en a d'abord cherché la cause. Elle réside dans la couche d'oxyde qui se forme autour du tungstène (figure 1), pen-

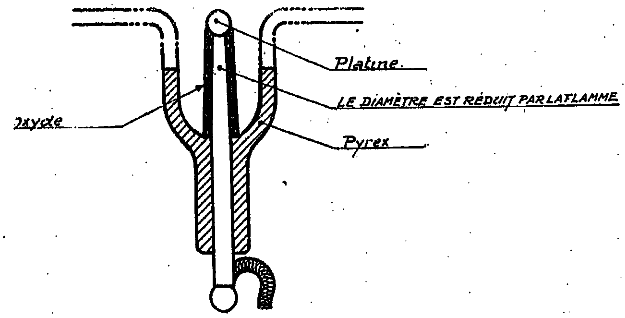


Fig. 2. — Electrode de tungstène platinée.

dant l'opération de son enrobage dans le verre. On a cherché à éliminer cette couche d'oxyde par l'action de l'acide chromique, de la potasse : mais ces méthodes n'ont pas pu entrer dans la pratique.

Le nouveau procédé qui a été institué consiste à souder à l'extré-

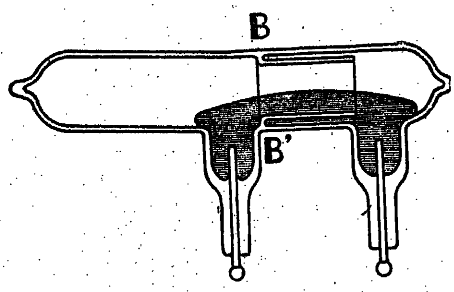


Fig. 3. — Interrupteur renforcé à fourrure intérieure soudée suivant BB'.

mité du tungstène, avant son enrobage dans le verre, une perle de platine : opération d'ailleurs difficile, en raison de la température de fusion du platine (1 800° C environ), température à laquelle la vitesse d'oxydation du tungstène devient extrême. Il y faut de l'adresse et un tour de mains. L'électrode, ainsi munie de sa goutte, après enlèvement de l'oxyde déposé sur le reste du tungstène, est enrobée dans le verre selon la technique habituelle (anneau intermédiaire) et l'on obtient la disposition de la figure 2. Comme l'on voit, l'abaissement de la résistance interne ne provient que de la présence de la goutte

de platine puisque, partout ailleurs, la couche d'oxyde subsiste ; mais il est considérable, car tout le courant, sensiblement, passe par le platine et, ainsi, évite de traverser l'oxyde. On obtient ainsi deux résultats, liés d'ailleurs l'un à l'autre : la résistance d'une électrode de dimensions courantes, par exemple de 2 mm de diamètre, est de

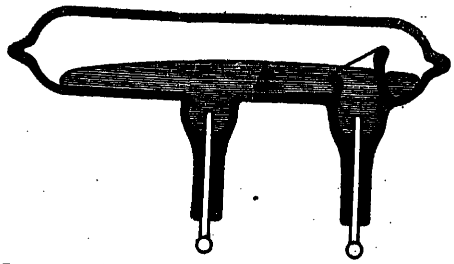


Fig. 4. — Interrupteur renforcé à cheminée intérieure soudée.

l'ordre du centième d'ohm et ce résultat subsiste jusqu'à des densités de courant de l'ordre de 2 A/mm².

On comprend qu'il est superflu de chercher à enrober de platine tout le tungstène : le gain serait insignifiant et la goutte terminale suffit.

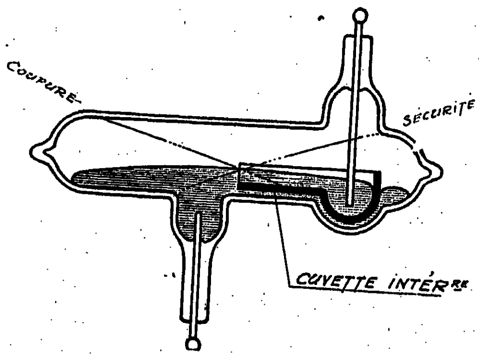


Fig. 5. — Interrupteur renforcé à cuvette en stéatite ou quartz non soudée.

Le résultat, non seulement trouve son application dans le cas des distributions à 6 V pour lesquelles il a été imaginé, mais encore permet d'accroître l'intensité limite des interrupteurs de forte puissance. Un interrupteur, qui, sous 35 A, atteindrait la température d'ébullition du mercure (350° C), transmet, ainsi transformé, 75 A sans qu'aucun échauffement anormal se produise.

Aussi ce progrès a-t-il été généralisé dans tous les interrupteurs Serpi et est-il même imposé maintenant dans un grand nombre de cahier des charges.

Interrupteurs pour tensions supérieures à 220 V.

Dans la voie de la même technique, mais au pôle opposé, parlons du cas des distributions à haute tension supérieures à 300 V.

En 1925, nous avions mentionné déjà la solution bien connue de la chemise intérieure : en stéatite, en quartz, etc ...

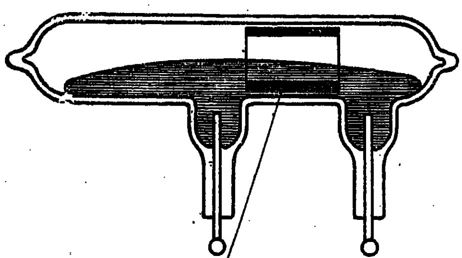


Fig. 6. — Interrupteur renforcé à chemise intérieure non soudee.

Ci-joint, fig. 3 et fig. 4 des interrupteurs à chemise soudée et à cheminée. Mais, pour la soudure, il faut que la chemise soit en verre. Le quartz résiste bien mieux, mais ne se soude pas. On ne peut donc

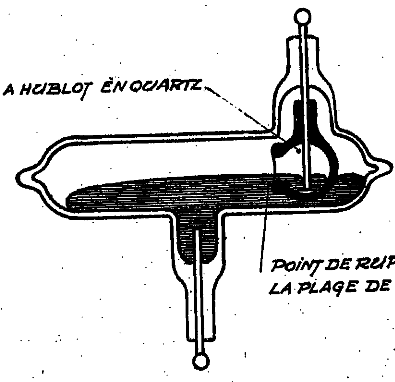


Fig. 7. — Interrupteur renforcé à hublot quartz.

que déposer la chemise, si elle est en quartz, dans l'ampoule en assurant entre la chemise et l'ampoule un contact aussi bon que possible.

C'est le cas des figures 5 et 6.

Mais ce dispositif présente un inconvénient grave — car il est pratiquement impossible d'éviter que, par agitation ou par volatilisation

en cours du fonctionnement, une certaine quantité de mercure ne vienne se loger dans l'intervalle capillaire ou semi-capillaire existant entre le corps de l'ampoule et la coupelle de protection.

Cette plage de mercure crée alors un court-circuit entre les 2 électrodes, et l'interrupteur meurt par l'échauffement et la rupture de cette plage.

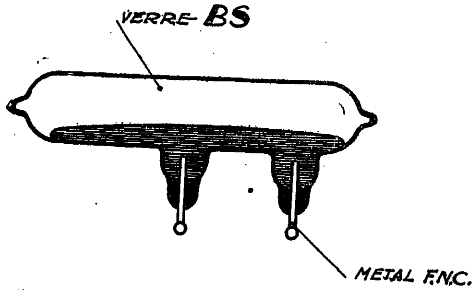


Fig. 8. — Interrupteur oo en verre Serpi BS.

C'est pour éviter cet accident que le dispositif « à hublot » de la figure 7 a été imaginé.

L'électrode supérieure plonge dans une petite capacité en quartz. Le mercure s'écoule par le hublot, et la coupure se fait invariablement sur les lèvres du hublot, c'est-à-dire du quartz.

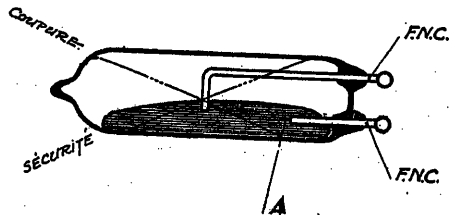


Fig. 9. — Interrupteur de la série ooo en verre Serpi BS.
La coupure du courant se fait entre le mercure et la pointe de F.N.C. en A.

On coupe ainsi sans difficulté des courants de 10 A sous 1 000 V ou de 35 A à 50 A sous 110 ou 220 V, sur circuits à forte self. Le nombre des coupures peut être considérable sans que le quartz présente la moindre trace de fatigue et, dans tous les cas, il n'apparaît sur le verre de l'ampoule aucun symptôme de détérioration.

II. — Nouvelle technique pour les interrupteurs de faible puissance

Les verres borosilicatés sodiques résistent mieux aux étincelles électriques que les verres borosilicatés potassiques.

Des expériences ont été faites à la S. R. P. I. qui le démontrent.

Aussi, l'emploi du Pyrex ou du Sibor, qui sont des borosilicatés sodiques, reste-t-il indispensable pour les interrupteurs de puissance. Mais, pour les faibles puissances, une nouvelle solution a permis

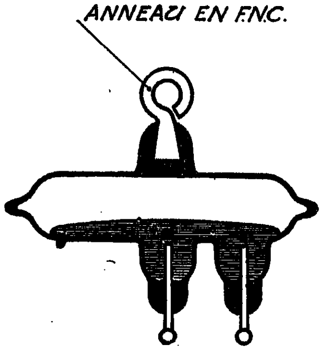


Fig. 10. — Interrupteur de la série PA.

d'élaborer des types économiques en supprimant l'emploi du tungstène.

Ce nouveau type utilise les propriétés que confère au verre la substitution, tout au moins partielle, de chaux à l'anhydride borique en

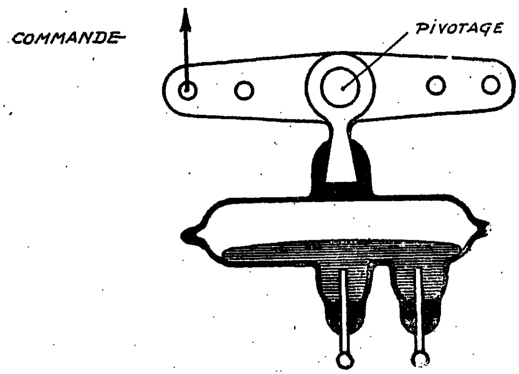


Fig. 11. — Interrupteur de la série PB.

même temps que la teneur en soude est très fortement accrue. On obtient ainsi le verre B S auquel on associe des entrées de courant en ferro-nickel-chrome. Un interrupteur de ce type, représenté sur la figure 8, peut assurer plusieurs centaines de milliers de coupures sous 110 V et 3 A.

Le ferro-nickel-chrome a une propriété remarquable. Il ne s'amalgame pas avec le mercure en temps normal mais, si l'on fait jaillir

l'étincelle entre une pointe de ferro-nickel et le mercure, l'amalgame se fait au point précis que touche l'étincelle ; à partir de ce moment, le contact devient parfait, et les coupures sont de même espèce que celles qui se produisent entre deux plages de mercure.

Ceci permet de réaliser des interrupteurs où la coupure s'opère entre mercure et métal, tant que l'on ne demande pas à ces appareils une capacité supérieure à 200 W.

Voici, sur la figure 9, un interrupteur de la série 000 ainsi constitué. Il se caractérise par ses petites dimensions, par le faible effort et le petit angle de basculement nécessaires pour son fonctionnement.

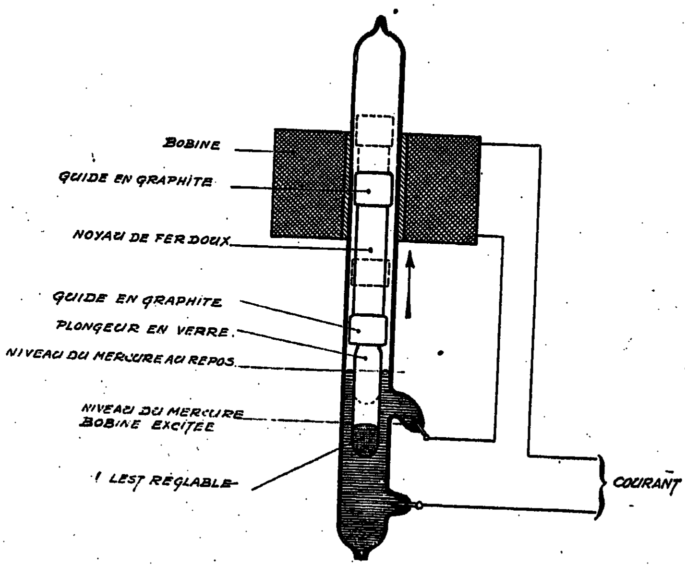


Fig. 12. — Télérupteur JO monté en clignoteur.

Les supports enrobés. — La parfaite homogénéité de la soudure entre le F N C et le verre B S a permis de créer des supports d'interrupteurs soudés au corps même du tube — ce qui facilite beaucoup le montage du tube dans l'appareillage qui le manœuvre.

Les figures 10 et 11, qui représentent des interrupteurs de ce type, P A et P B, font comprendre combien le montage en est rendu aisé.

III. — Applications

Terminons ce rapide exposé en indiquant deux applications que les progrès de la technique ont rendues possibles.

1° *Télérupteurs à plongeur interne.*

Le basculement de l'interrupteur est parfois une sujétion, dont on cherche à se libérer.

De multiples tentatives avaient été faites, sans grand succès, dans le but de réaliser des télérupteurs où un noyau de fer doux, plongeant dans le mercure, fût actionné par un champ magnétique extérieur.

On se heurtait à l'usure du verre par le frottement du noyau, à la

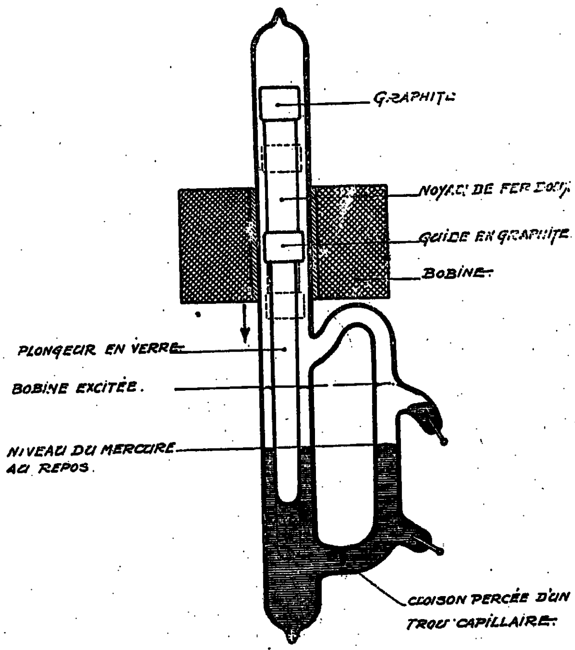


Fig. 13. — Télérupteur JAP. — Retard de 1" à 5".

destruction du fer doux au voisinage de l'étincelle, aux irrégularités de fonctionnement dues au calibrage du noyau, etc...

Toutes ces difficultés ont été surmontées.

La figure 12 fait voir un télérupteur type JO, d'une sécurité de marche assurée et capable de réaliser des centaines de milliers de coupures de 5 A sous 110 V, à la cadence de 100 pulsations à la minute.

Deux dispositions sont essentielles. Le guidage du noyau de fer doux par deux bagues de graphite Acheson est la première ; le frottement est ainsi rendu très doux et l'usure n'est plus appréciable.

La deuxième consiste à empêcher le noyau de toucher le mercure, en le munissant à sa partie inférieure d'un plongeur en verre.

Ces télérupteurs ont l'avantage de ne comporter aucune pièce mécanique en mouvement et de supprimer tout entretien.

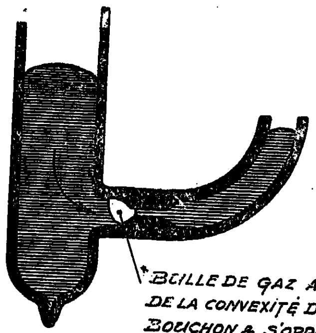


Fig. 14. — Temporisation par écoulement de mercure à travers un tube capillaire.

Celui que représente la figure 13 est de même famille, mais me permet de signaler au passage la disposition adoptée pour réaliser un fonctionnement différé, ce qui est un des traits caractéristiques de l'interrupteur à mercure.

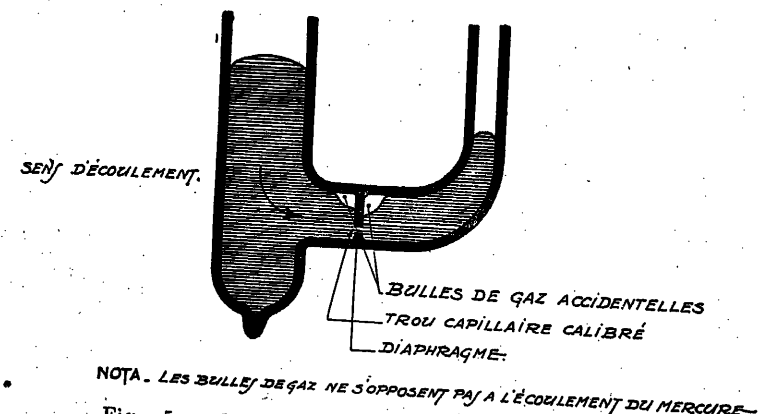


Fig. 15. — Dispositions principales d'un diaphragme pour télérupteur JA temporisé.

Dans ce type, les déplacements rapides du mercure dans la branche de gauche ne produisent que des déplacements lents, à droite, du fait du diaphragme intermédiaire percé d'un trou capillaire, qui est calibré au centième de millimètre près au moyen d'un foret en tungstène.

Au cours du fonctionnement d'un interrupteur temporisé par un

tube capillaire, il arrive fréquemment qu'une bulle de gaz (hydrogène) se loge à l'entrée du tube ; la bulle provient, soit de déplacements brusques de la masse de mercure, soit d'un phénomène de dissolution progressive et de cheminement du gaz. A certains moments cette bulle forme bouchon (fig. 14) et le mercure ne s'écoule plus. L'interrupteur ne peut plus fonctionner.

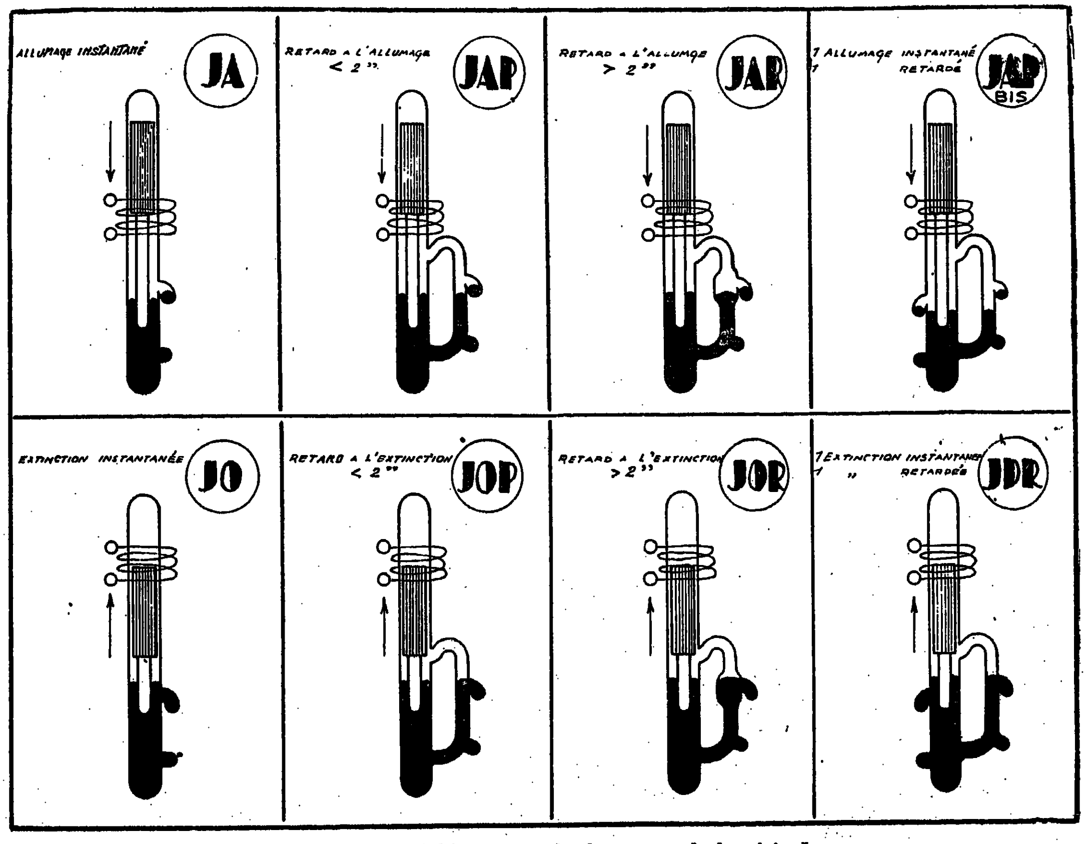


Fig. 16. — Télérupteurs à plongeurs de la série J.

Avec le diaphragme, l'inconvénient est évité si on prend soin de percer le trou capillaire à la base du diaphragme. Si une bulle de gaz se forme, elle vient se loger à la partie supérieure du diaphragme (fig. 15) ; quand elle est suffisamment grosse, elle s'échappe. Il n'y a donc ainsi aucun trouble à redouter dans l'écoulement.

Les diverses combinaisons de retard à l'allumage et à l'extinction sont réalisées sans difficulté, comme le montre la figure 16.

2° *Nouveaux thermostats.*

Voici, en terminant, l'exemple d'une autre application qui utilise les perfectionnements ci-dessus décrits, notamment la nouvelle technique avec électrodes en ferro-nickel-chrome.

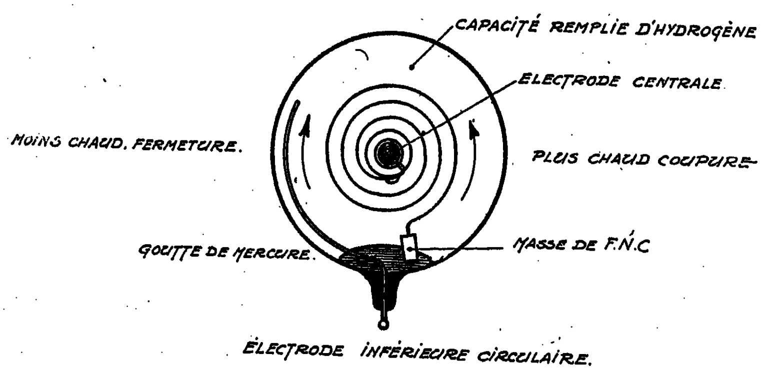


Fig. 17. — Thermostat à bilame type A. Travaillant par rayonnement.

Il s'agit de thermostats ou de limiteurs de température.

La plupart des thermostats industriels sont constitués par des lames bimétalliques, qui se déforment sous l'influence des variations

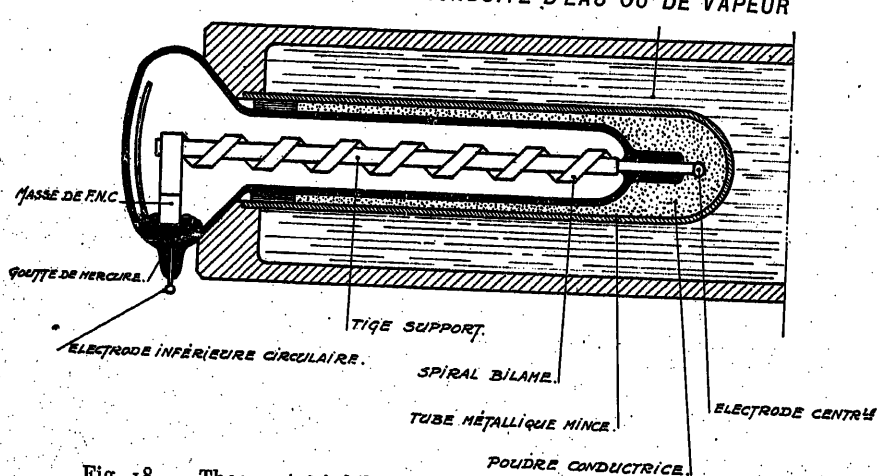


Fig. 18. — Thermostat à bilame type B, travaillant par conduction.

de température. Ces déformations ont pour effet d'ouvrir ou de fermer un circuit, soit en amenant au contact deux paillettes métalliques, soit en manœuvrant un interrupteur de petites dimensions mais, dans

le premier cas, on se heurte aux inconvénients des contacts secs et, dans le deuxième, l'effort nécessaire au basculement de l'interrupteur contraint d'employer un bilame de grande section que son inertie calorifique rend impropre à suivre les variations très rapides de température.

Dans les nouveaux appareils, que les figures 17 et 18 représentent, on a placé le bilame à l'intérieur d'une capacité en verre et on a traité tout l'appareil comme un véritable interrupteur à mercure : on le vide, on le purge et on le remplit d'hydrogène. Il semble que cet

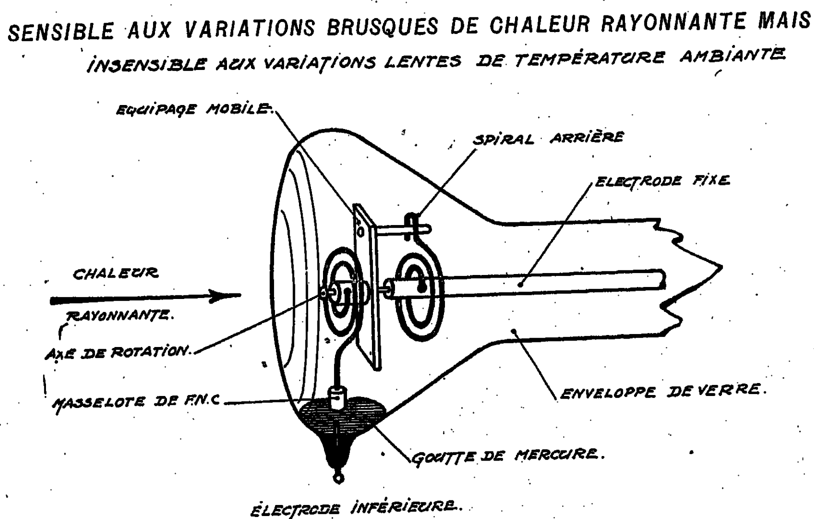


Fig. 19. — Thermostat différentiel type D.

appareil présente quelques assez réels avantages. C'est d'abord sa sensibilité ; elle est évidemment fonction de la longueur, qui peut être assez grande en raison de l'effort minime qu'on demande au bilame (vaincre la tension capillaire du mercure) et de la faible capacité calorifique due à ses faibles dimensions (épaisseur 0,02 cm, largeur 0,3 cm). C'est aussi l'accroissement de conductibilité calorifique due à l'atmosphère d'hydrogène — C'est enfin le peu d'inertie.

L'appareil existe en deux types : le thermostat type A fonctionne plus particulièrement sous l'effet du rayonnement, tandis que le type B fonctionne par conduction calorifique.

Dans certaines applications, notamment pour contrôler la permanence d'une flamme, problème qui se pose dans les appareils de chauffage central au mazout, il faut un dispositif qui soit sensible à une variation brusque du rayonnement et insensible à une modifi-

cation lente de la température ambiante. C'est ce que résoud le type D (fig. 19).

Le spiral bilame avant y est monté sur un équipage mobile entraîné lui-même par un spiral arrière de sens inverse. Si les deux spiraux sont soumis à une même variation de la température ambiante, leurs actions se contrarient et l'extrémité libre du spiral avant ne se déplace pas. Si, au contraire, ce dernier reçoit, plus que la bilame arrière, un rayonnement calorifique, la différence d'action des deux bilames se révèle et, s'il y a lieu, elle produit le déclanchement.

L'apparition de la source et sa disparition sont ainsi contrôlées, quelle que soit la température ambiante.

Conclusion

Notre exposé a eu pour objet de signaler quelques progrès réalisés dans la fabrication des interrupteurs et d'y rattacher, pour les illustrer, la description d'appareils qui les utilisent. Mais, dans ce domaine, la difficulté vient de ce que les variantes se multiplient à l'infini, et qu'on risque de se perdre dans les détails. Les deux exemples que nous avons donnés, auront suffi pour que nous atteignons le but visé, et bien qu'il eût été aisé de leur en adjoindre nombre d'autres, nous nous y limiterons.

LA MESURE ET L'ANALYSE DES BRUITS PRODUITS PAR LES MACHINES ELECTRIQUES [1]

par M. P. Baron,

Chef du Laboratoire d'Etudes de la C. P. D. E.

Ce rapport traite de l'analyse des bruits en sons simples et de leur décomposition en bandes de fréquence.
Après avoir rappelé les caractéristiques fondamentales de l'audition, l'auteur examine ensuite les diverses méthodes de mesure de bruits couramment employées : méthode objective, méthode de Barkausen, méthode de masque, et termine par une étude comparative de ces diverses méthodes.

Avant de songer à mesurer une grandeur, il est nécessaire de la définir.

Or, s'il est possible de définir rigoureusement les caractéristiques d'un son pur et d'un son musical, on ne peut que commenter la signification du terme « bruit ».

Un bruit est, en effet, un véritable mélange de sons purs dont les hauteurs ne présentent entre elles aucun rapport commun, et dont les intensités subissent généralement des variations continuelles. A ceci, viennent encore se superposer des phénomènes transitoires et également ce qu'on peut appeler, par une analogie optique, des spectres de bandes, c'est-à-dire des régions plus ou moins étendues où une énergie importante peut exister sans qu'aucun son pur ne se révèle (cas du passage de l'air dans les canaux de ventilation des machines).

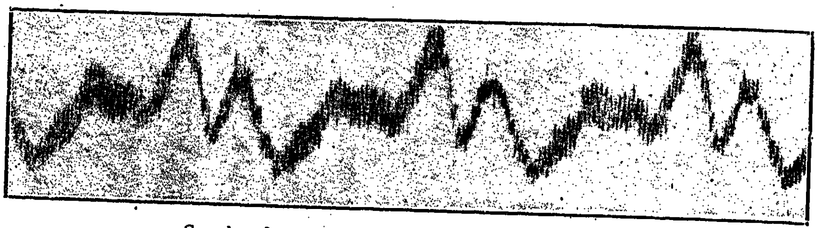
Pour chacune de ces raisons, les bruits échapperaient à toute définition mathématique.

On conçoit toutefois que si l'on pouvait intégrer un tel phénomène à l'aide d'un appareil suffisamment inerte, tel un appareil thermique, on en verrait l'aiguille se fixer à une position assez stable qui indiquerait ainsi ce que nous conviendrons d'appeler l'intensité du bruit, malgré que ce terme n'ait théoriquement aucun sens.

Les figures qui suivent représentent quelques relevés oscillographiques de bruits de machines.

---

(1) Ce rapport présenté aux 5e et 6e sections, sera discuté à la Semaine de novembre 1932 de la Société française des Electriciens.



Courbe de référence à la fréquence 250 p:s.

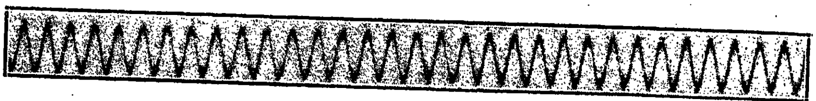


Fig. 1. — Bruit produit par un groupe de charge d'accumulateurs tournant à 80 t:mn

On remarquera une onde porteuse de fréquence 25 p:s. Elle provenait des vibrations que le groupe transmettait au microphone par l'intermédiaire du plancher sur lequel il se trouvait placé.

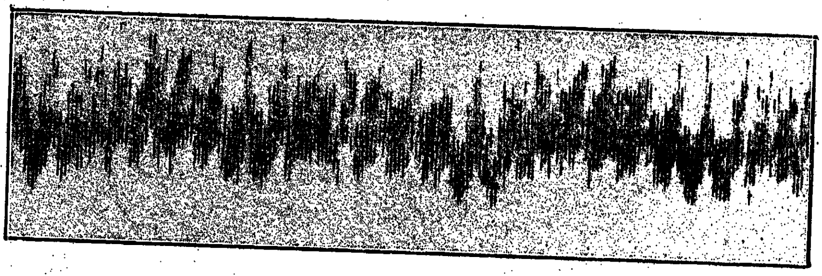


Fig. 2. — Bruit produit par le même groupe et au même emplacement, ce groupe étant isolé du sol.

Le groupe ayant été placé sur des amortisseurs qui ont absorbé les vibrations transmises précédemment au plancher, seul parvenait au microphone le bruit transmis directement par l'air.

Pour la comparaison des deux relevés, il convient de diviser par 2,5 les amplitudes de ce dernier (changement de gain de l'amplificateur).

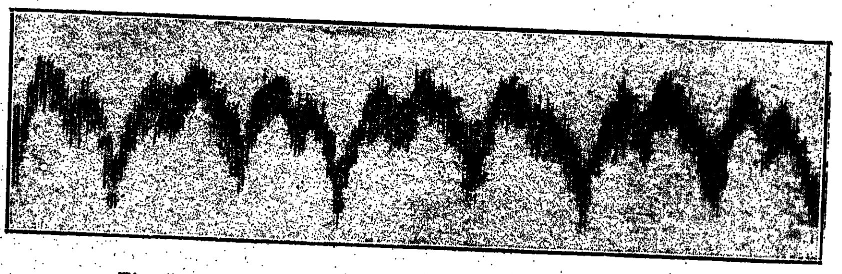


Fig. 3. — Bruit produit par le même groupe non isolé, mais à un emplacement différent.

Ce relevé a été effectué dans les mêmes conditions que celui de la fig. 1, mais à une distance de 1,20 m du groupe au lieu de 3 m.

Pour la comparaison des 2 relevés, il faut diviser par 1,7 les amplitudes de celui-ci.

On remarquera qu'il se produisait des phénomènes d'ondes stationnaires qu'on percevait d'ailleurs d'une façon très distincte.

De tels relevés sont généralement très complexes et on peut y distinguer tout au plus une ou deux fréquences prépondérantes.

Par ailleurs il y a lieu d'envisager un second aspect de la question : celui de la perception des bruits ; là encore nous nous trouverons aux prises avec de sérieuses difficultés et nous serons amenés à faire des hypothèses que nous savons *à priori* inexactes.

La mesure des bruits présentera donc nécessairement un caractère plus expérimental, plus empirique même, que scientifique ; mais

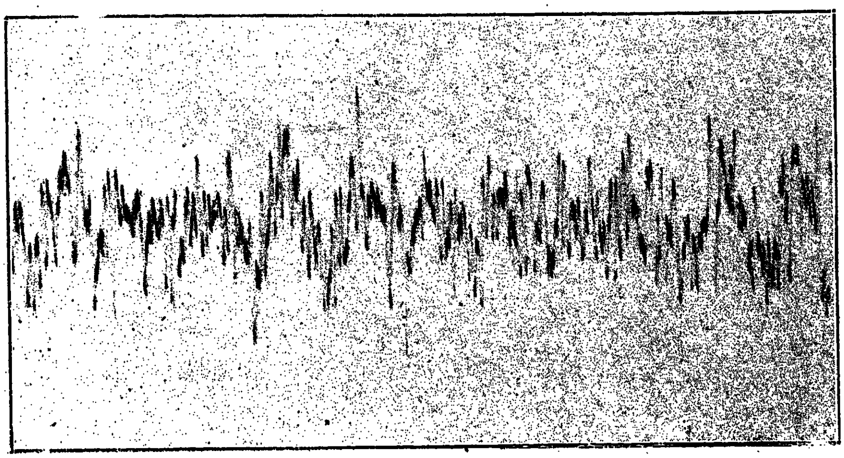


Fig. 4. — Bruit par un groupe asynchrone synchronisé de 1 500 kW tournant à 750 t:mn.

Ceci est un oscillogramme-type de bruit, en ce sens qu'on ne peut généralement tirer de ces oscillogrammes aucun renseignement précis sur la nature des bruits.

nous verrons qu'il est néanmoins possible de l'effectuer avec une précision largement suffisante, eu égard au but visé.

Nous allons successivement examiner dans le présent rapport :

1° La décomposition des bruits en sons simples.

2° Leur décomposition en bandes de fréquence.

3° La mesure des bruits.

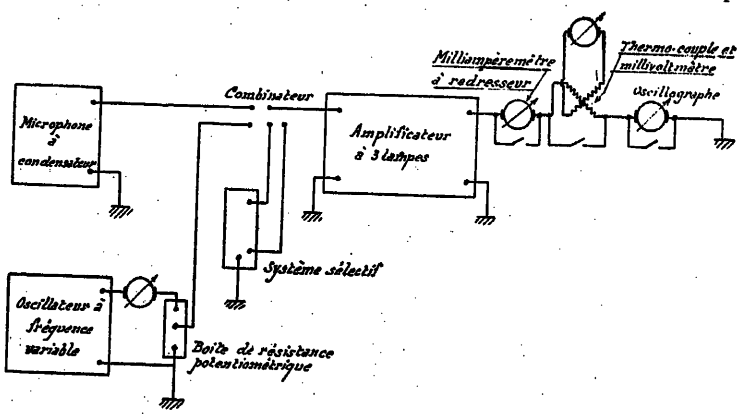
I. DÉCOMPOSITION DES BRUITS EN SONS SIMPLES

A. — Description de l'appareil d'analyse

L'appareil d'analyse que nous avons réalisé est basé sur la méthode bien connue de résonance et comprend essentiellement, ainsi que le montre le schéma n° 5, un ensemble composé d'un microphone,

de circuits résonnants et d'un amplificateur, ensemble auquel était joint un oscillateur à fréquence variable permettant d'effectuer l'étalonnage en hauteur et en intensité des sons repérés.

D'autres méthodes d'analyse, plus élégantes peut-être, telles que des méthodes de battements, ont été imaginées ces derniers temps mais, si elles présentent un certain intérêt dans le cas de sons musicaux où les fréquences qu'on peut rencontrer sont connues *à priori*,



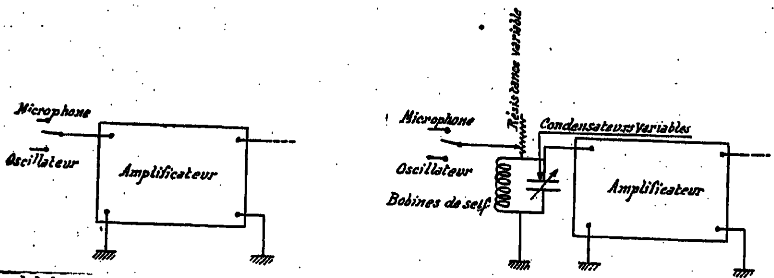


Schéma dans le cas de la mesure de bruits.

Schéma dans le cas de l'analyse de bruits.

Fig. 5. — Schéma de principe de l'appareil de mesure et d'analyse des bruits.

leur application à des bruits de nature complexe est, par contre, très délicate.

Avant de passer aux applications pratiques de notre appareil, nous allons en décrire succinctement les éléments constituants.

1° Le microphone.

On sait que le microphone à condensateur est, à l'heure actuelle du moins, le meilleur appareil d'étude du son [2] : son efficacité est

(2) On vient de mettre au point un microphone électrodynamique qui, tout en reproduisant une zone de fréquences plus étendue que le microphone à condensateur, serait moins délicat que ce dernier.

sensiblement indépendante de la hauteur et reste très constante dans le temps, à la condition toutefois que certaines précautions soient prises. Aussi est-ce un tel microphone que nous avons adopté. Il était inséré dans un circuit résonnant à haute fréquence suivant le montage classique.

Sa courbe d'efficacité relative en fonction de la hauteur, déterminée au moyen de la méthode du thermophone que M. Chavasse a exposée récemment dans une réunion de la 5[e] section, est représentée sur la figure 6.

Nous croyons toutefois utile de signaler qu'en appliquant cette méthode, on calcule la pression acoustique frappant le microphone, en ne tenant nullement compté de la perturbation apportée par cet appareil au champ acoustique dans lequel on le place.

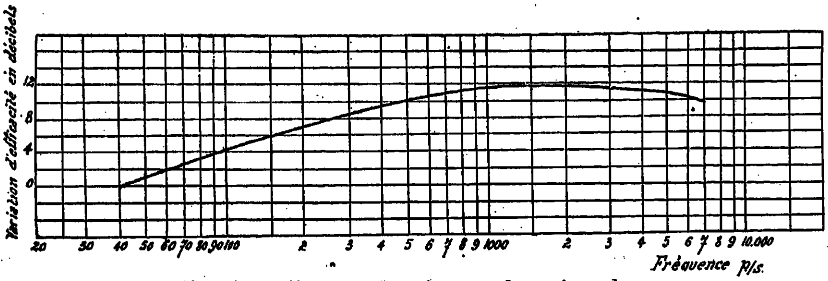


Fig. 6. — Courbe de réponse du microphone employé pour effectuer l'analyse des bruits.

L'efficacité est déterminée par le rapport entre la tension produite par le microphone et la pression acoustique correspondante.

Soit α une telle efficacité, les ordonnées de la courbe représentent les variations de la quantité $20 \log_{10} \alpha$; quantité qui s'exprime en décibels.

Par ailleurs, lors de ses conditions d'emploi, le champ acoustique régnant autour du microphone ne ressemble en rien au champ uniforme dans lequel il est étalonné.

Il ne faut donc attacher à de telles courbes d'étalonnage qu'un intérêt très relatif ; mais heureusement, dans les applications pratiques de l'analyse des bruits, ce que l'on désire généralement connaître ce sont uniquement les variations d'intensité éventuelles de sons de hauteur déterminée.

2° L'amplificateur.

Cet amplificateur, à liaisons par résistances et condensateurs, avait, bien entendu, une distorsion en fréquence et en amplitude pratiquement nulle. Son gain pouvait varier dans de larges limites en utilisant à cet effet la résistance de couplage située entre deux

étages ; son débit était mesuré par un appareil à redresseur ou à thermocouple. On pouvait, par ailleurs, intercaler à la sortie de l'amplificateur un oscillographe Blondel sur lequel était enregistrée également une courbe de référence provenant d'un diapason.

3° Le dispositif d'analyse.

Le dispositif d'analyse était composé d'une résistance et d'un circuit anti-résonnant placés en série, l'ensemble étant attaqué par le microphone et le circuit anti-résonnant seul relié à l'amplificateur.

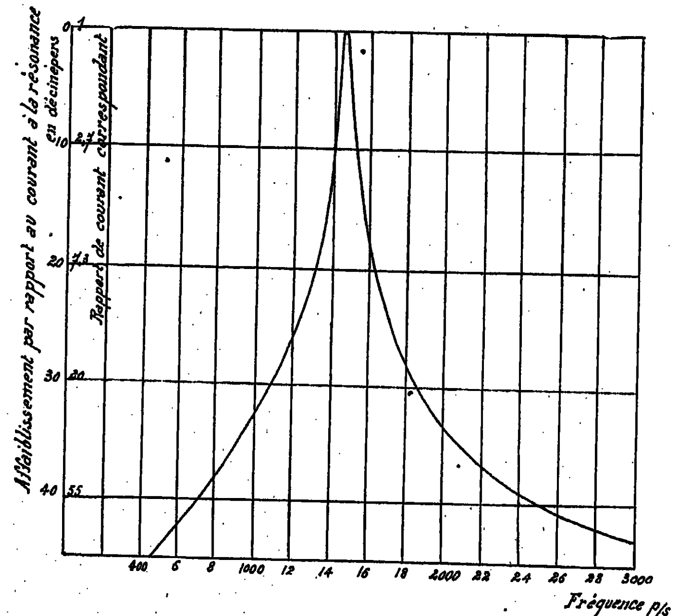


Fig. 7. — Courbe de sélectivité d'un circuit oscillant.

Ce circuit comprenait une bobine d'inductance et une série de condensateurs fixes ou variables. Sa résistance équivalente à la résonance étant nécessairement variable avec la fréquence, la résistance placée en série avec lui était fractionnée de façon à obtenir une sélectivité suffisante sans perdre trop de puissance.

Par ailleurs, une seule bobine n'aurait pas permis de couvrir la zone entière d'audibilité comprise entre 25 et 10 000 p:s, aussi quatre bobines différentes furent-elles utilisées. Leurs zones respectives d'utilisation, ainsi que la valeur convenable de la résistance placée en série, avaient été déterminées une fois pour toutes, en se basant sur des considérations de sélectivité.

Cette sélectivité, ainsi qu'on le constatera sur la figure 7, était telle

qu'une variation de fréquence de 2 pour cent produisait une variation d'intensité de 50 pour cent. Il semblait, par là, possible d'analyser des bruits très complexes, d'autant plus que, se servant d'appareils de mesure de courants efficaces, on peut toujours s'arranger pour se trouver vers l'extrémité de l'échelle, c'est-à-dire dans une zone de sensibilité maximum.

Une augmentation de sélectivité eût pu être obtenue, soit en employant un second circuit résonnant, soit en ayant recours à des dispositifs spéciaux, tels que celui de l'amplificateur sélectif de M. PAGÈS ou le montage à pont mis récemment au point par MM. BRILLOUIN et LÉVY ; mais, en ce qui nous concerne, elle n'était nullement désirable par suite du peu de stabilité en hauteur des différents sons contenus dans le bruit.

4° ETALONNAGE.

Lorsqu'un son était repéré, on en déterminait immédiatement la hauteur et l'intensité en remplaçant le microphone par un oscillateur, dont on réglait d'une part la fréquence, de façon à la mettre en résonance sur la fréquence propre du circuit oscillant et la tension d'autre part, jusqu'à ce qu'on recueillît à la sortie de l'amplificateur le même courant qu'avec le microphone. Cette tension est proportionnelle à la pression, c'est-à-dire à la racine carrée de l'intensité du son (3).

Remarquons, par ailleurs, qu'en supprimant les circuits oscillants, on pouvait mesurer, sans déformation appréciable, la pression efficace des bruits, le redresseur devant être dans ce cas remplacé par un thermo-couple.

B. — Résultats obtenus

Après avoir vérifié le fonctionnement de cet appareil en utilisant à cet effet un haut-parleur dans lequel avait été introduite une forte distorsion, nous l'avons placé devant un groupe convertisseur de la C. P. D. E. et nous avons alors constaté, qu'en faisant varier progressivement l'accord des circuits résonnants, le courant débité par

(3) On sait que l'intensité I d'un son, c'est-à-dire le flux d'énergie par unité d'aire, est liée à la pression P par l'expression :

$$I = \frac{P^2}{\rho C}$$

où ρ désigne la densité du milieu et C la vitesse de propagation. Elle s'exprime en watts par cm².

l'amplificateur ne subissait que des variations très lentes et qu'en particulier, il ne passait jamais par des maxima suffisamment nets et stables pour qu'on puisse conclure à la présence certaine d'un son.

Un tel fait tendrait donc à indiquer que les bruits de ces machines renferment un nombre de sons purs considérable.

Et en effet un écouteur téléphonique placé à la sortie de l'amplificateur rendait sans discontinuité tous les sons audibles ; de plus, avec un oscillographe BLONDEL on obtenait des relevés sur lesquels on reconnaissait une fréquence qui était toujours très voisine de la

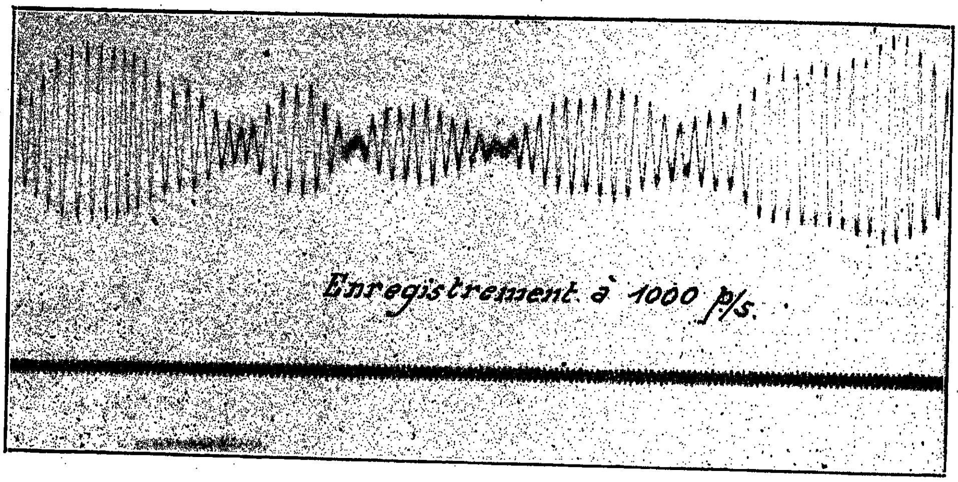


Fig. 8. — Oscillogramme obtenu lors de l'analyse d'un bruit.

Cet oscillogramme a été pris le circuit oscillant étant accordé sur une fréquence quelconque ; la fréquence relevée sur l'oscillogramme fut très voisine de la fréquence propre de ce circuit oscillant.

fréquence propre des circuits oscillants. Un de ces relevés est reproduit sur la figure 8. On y voit que l'amplitude varie d'une façon constante, fait qui, à notre avis, doit être imputé, d'une part à des variations correspondantes dans l'intensité du son et, d'autre part, à des battements qui se produisent entre des sons de hauteur très voisine.

Il ne faudrait certes pas généraliser ce résultat et il arrive parfois que certains sons aient une intensité telle qu'ils émergent d'une façon suffisamment nette de tout cet ensemble et dans ce cas d'ailleurs, l'oreille les perçoit souvent d'une façon distincte.

La hauteur exacte d'un son qu'on aurait ainsi repéré ne sera généralement pas déterminée d'une façon très précise par suite du peu de netteté de la résonance et il est alors commode de rechercher

les battements qui peuvent se produire entre le bruit et un oscillateur à fréquence variable.

Enfin, en ce qui concerne la détermination de l'intensité du son, elle est évidemment entachée d'une erreur d'autant plus grande que la résonance est plus floue.

Tout ceci nous montre qu'en représentant les résultats d'une analyse de bruits uniquement sous la forme d'un spectre composé d'un certain nombre de raies, on ne traduit généralement que d'une façon très incomplète la réalité.

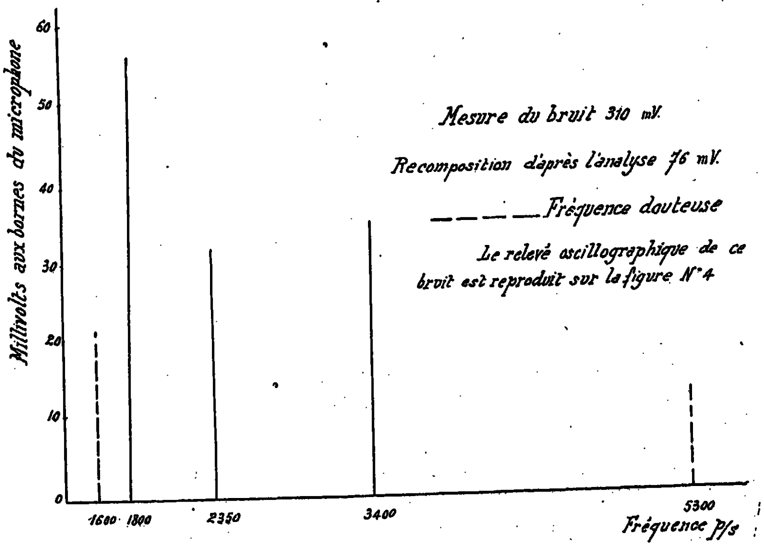


Fig. 9. — Analyse du bruit d'un groupe asynchrone synchronisé de 1 500 kW tournant à 738 t:mn.

Une telle figure est schématique puisque on n'y retrouve que 6 pour cent de l'énergie totale contenue dans le bruit.

Par ailleurs, la mesure de l'intensité des sons est erronée par excès, la résonance étant très floue. En réalité, on se trouve en présence d'un spectre sensiblement continu.

C. — Quelques exemples d'analyse

1° Analyse du bruit d'un groupe asynchrone synchronisé de 1 500 kW tournant a 738 t:mn (figure 9).

Nous sommes ici devant un de ces bruits très complexes dont nous avons signalé l'existence.

Un son aigu y est néanmoins perçu d'une façon nette par suite de son intensité relative assez forte, ainsi que des variations continuelles que subit cette intensité. Ce son apparaît également à l'analyse et la détermination de sa hauteur — 1 800 p/s — permet d'en

reconnaître la provenance, cette hauteur étant égale au produit de la vitesse de la machine par le nombre d'encoches au rotor du moteur asynchrone.

On distingue également, mais d'une façon très imprécise, divers autres sons d'intensité plus faible.

Notre figure est donc tout à fait schématique, l'analyse ne nous ayant permis de déceler que 6 pour cent de l'intensité sonore du bruit total.

Il faut toutefois reconnaître que, si on arrivait à réduire suffisamment le son de hauteur 1 800 p:s, il en résulterait une amélioration certaine dans l'effet de gêne produit par ce bruit.

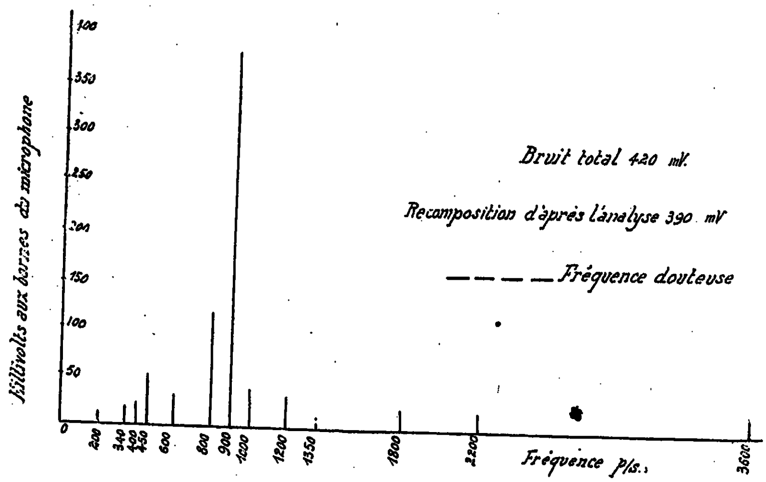


Fig. 10. — Analyse du bruit d'un groupe asynchrone compensé de 3 oco kW courant à 495 t:mn.

On reconnaîtra dans ce cas un son pur qui domine nettement tous les autres et renferme presque toute l'énergie sonore.

2° Analyse du bruit d'un groupe asynchrone compensé de 3 000 kW tournant a 495 t:mn (figure 10).

On perçoit, aux alentours de la machine, un nombre assez important de bruits divers, tous très complexes. Toutefois, à mesure qu'on s'éloigne de cette machine, un son aigu, qui près d'elle était masqué par les sons graves, prend de plus en plus d'importance et il est seul entendu hors de la sous-station dans laquelle elle se trouve placée.

Ainsi qu'il se produit chaque fois qu'un son pur est émis dans une salle, on distinguait des ondes stationnaires très nettes. Mais de plus les ondes stationnaires se déplaçaient ici continuellement ce qui donnait au son un caractère d'instabilité très désagréable.

Lorsque plusieurs machines semblables sont mises simultanément en marche, ces sons purs donnent lieu à des battements qui suivent toutes les fluctuations de la répartition de la charge entre les machines.

Or, ce son particulier apparaissait d'une façon extrêmement nette à l'analyse, car il renfermait à lui seul la quasi totalité de l'énergie sonore.

Divers autres sons, d'intensité nettement moindre, et qui étaient généralement des harmoniques du son précédent, de hauteur 900 p:s, étaient également très aisément relevés.

L'origine de ce son fondamental était la même que dans le cas précédent.

L'analyse du bruit d'une telle machine présente donc un intérêt particulier, puisqu'elle nous permet de déceler la provenance exacte d'un son particulièrement nuisible et d'en suivre le cas échéant les variations d'intensité.

II. — DECOMPOSITION DES BRUITS EN BANDES DE FREQUENCE

L'analyse intégrale des bruits, lorsqu'elle est possible, reste néanmoins une opération qui généralement est très laborieuse.

Mais dans bien des cas de telles analyses ne sont pas indispensables, et il suffit de découper la zone des fréquences audibles en un certain nombre de bandes et de mesurer l'énergie contenue dans chacune d'elles.

Une des applications pratiques de ces analyses en bandes de fréquences consisterait, par exemple, à étudier l'effet exact de certains dispositifs qu'on aurait réalisés dans le but de diminuer la transmission d'un bruit hors du local où il est produit. Il existe, certes, des méthodes de mesure permettant de déterminer au laboratoire le coefficient de transmission du son par divers matériaux ; mais de telles mesures, malgré l'intérêt qu'elles présentent, sont d'une interprétation très délicate et il importe de les compléter par d'autres informations provenant de réalisations pratiques. Or, le coefficient de transmission du son par les matériaux ainsi que la sensibilité de l'oreille variant toutes deux notablement avec la hauteur des sons, on devra, non seulement mesurer le bruit total, mais décomposer ce bruit en des bandes de largeur telle que l'efficacité du dispositif utilisé ainsi que la sensibilité de l'oreille puissent y être considérés comme suffisamment constantes.

Il arrive également que, dans un bruit, une certaine zone de fréquences, variable d'ailleurs avec la nature de la machine, ses conditions d'installation et le tempérament particulier des personnes qui perçoivent ce bruit, soit seule considérée comme gênante, aussi convient-il dans ce cas de la considérer isolément.

A. — Description de l'appareil de décomposition des bruits en bandes de fréquence

Pour réaliser de telles décompositions, il suffisait d'intercaler dans le système décrit précédemment, au lieu de circuits résonnants, des filtres passe-bandes.

Nous avons en réalité été conduits à ce moment-là à apporter à

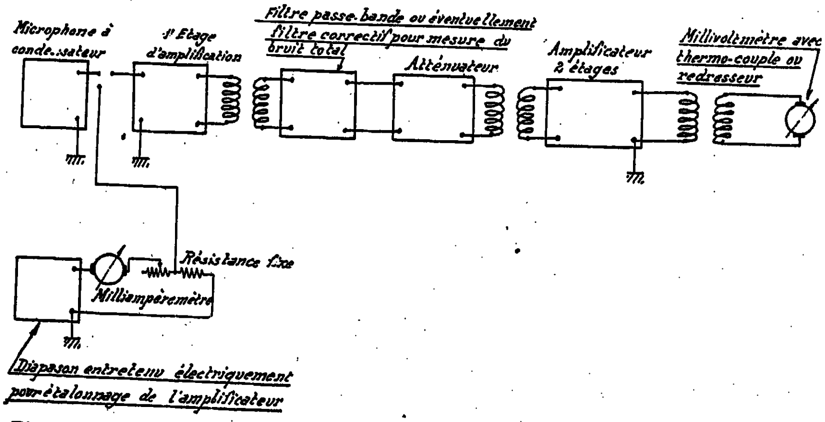


Fig. 11. — Schéma de principe de l'appareil de décomposition des bruits en bandes de fréquence et de mesure du bruit total.

notre appareil diverses modifications, ainsi que le montre le schéma 11. L'une d'elles consistait à utiliser, au lieu d'un amplificateur à gain variable, un amplificateur à gain constant précédé d'un atténuateur gradué en népers et décinépers. (On sait que si U_1 et U_2 sont les tensions en amont et en aval de l'atténuateur, celui-ci exprimera en népers la quantité $\log_e \frac{U_1}{U_2}$) Il suffisait, par suite, d'agir sur l'atténuateur de façon que le courant de sortie de l'amplificateur garde une valeur fixe pour lire ainsi directement des niveaux de bruits au-dessus d'un niveau zéro constant ; les corrections dues aux variations éventuelles de gain de l'amplificateur, corrections qui, dans notre cas, restaient pratiquement négligeables, étant déterminées à l'aide d'un étalonnage avec un diapason.

Rappelons qu'aux Etats-Unis on utilise généralement une autre

unité, le décibel, définie par l'expression : $20 \log_{10} \frac{U_1}{U_2}$. Enfin, il existe une dernière unité employée principalement en Allemagne : le phone, qui est définie par $\log_2 \frac{U_1}{U_2}$. Ces trois unités sont reliées par la relation :

1 phone = 6 décibels = 6,9 décinépers.

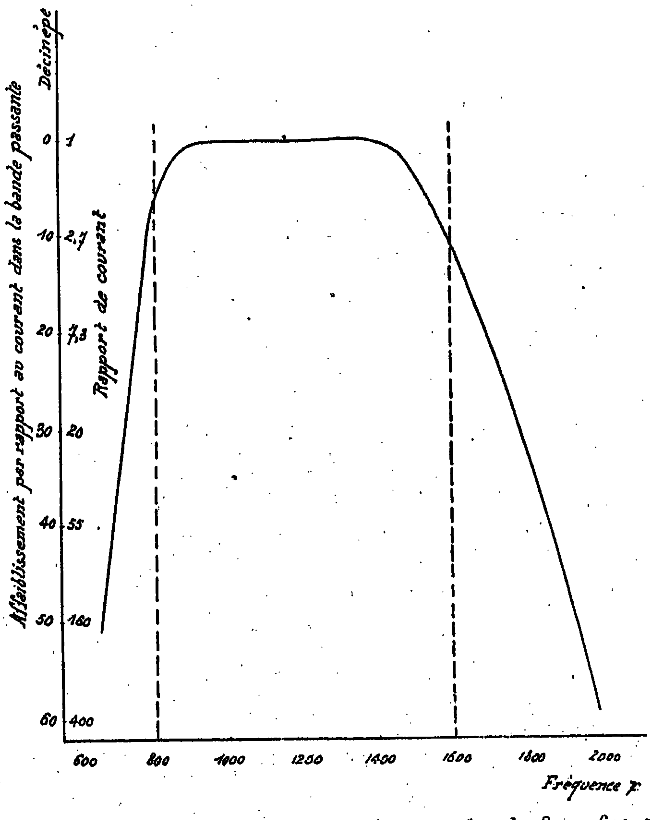


Fig. 12. — Caractéristique du filtre passe-bande 800-1 600 p:s

C'est généralement en l'une d'elles que se trouvent exprimés les résultats des mesures de bruits et cela en vertu de la loi suivant laquelle les sensations varient comme les logarithmes de l'excitation.

Ces unités sont d'ailleurs depuis longtemps, et pour la même raison, employées en téléphonométrie.

Ceci posé, les bandes passantes de nos divers filtres étaient limitées par les fréquences :

90-200, 200-400, 400-800, 800-1 600, 1 600-3 200,
3 200-6 400, 6 400-10 000 p:s.

Nous verrons qu'il était utile que la coupure se fasse d'une façon très nette, car il arrive que, d'une bande à la suivante, on rencontre des différences d'énergie considérables. La figure 12 montre que la sélectivité de ces filtres correspondait à un affaiblissement

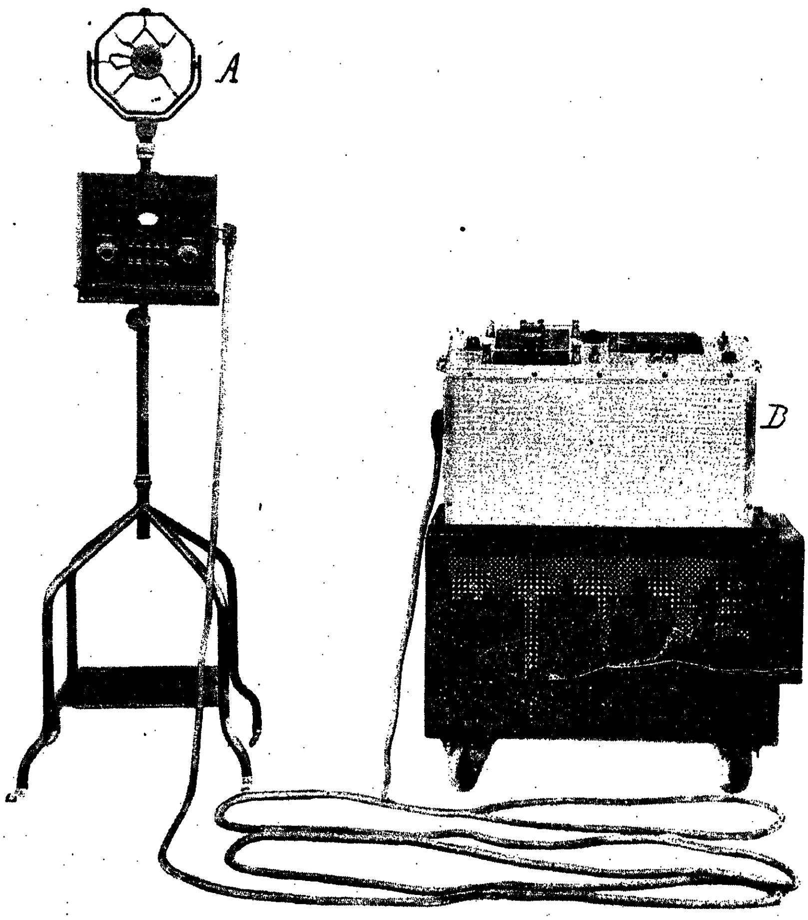


Fig. 13. — Vue d'ensemble de l'appareil de mesure de bruit et de leur décomposition en bandes de fréquence.

A. — Microphone à condensateur.
B. — Dispositif de mesure et d'étalonnage.
C. — Batteries d'alimentation.
Les filtres passe-bandes étaient placés sur un chariot indépendant.

de 8 décinépers aux fréquences de coupure et de 30 décinépers — rapport de courant de 1 à 20 — pour une variation de fréquence de 10 pour 100 de part et d'autre des fréquences de coupure.

Ici encore, en supprimant les filtres passe-bandes et en les remplaçant au besoin par un filtre correctif dont nous verrons plus loin les caractéristiques, on pouvait mesurer le bruit total.

La figure 13 indique la réalisation de l'appareil définitif que nous avons construit dans ce but.

B. — Résultats

Nous donnons, ci-dessous, les résultats d'une analyse en bandes de fréquence effectuée sur un certain nombre de groupes convertisseurs placés dans les sous-stations de la C. P. D. E.

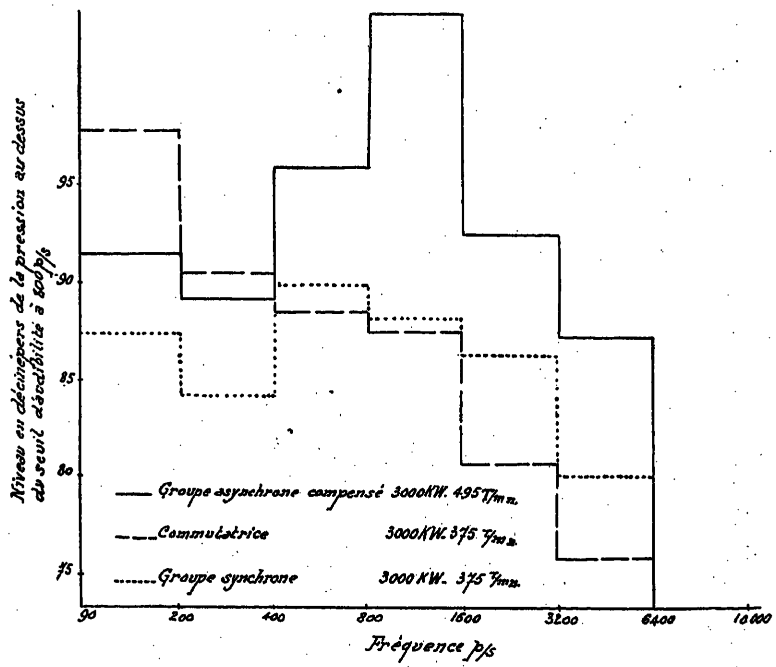


Fig. 14. — Décomposition du bruit en bandes de fréquence.

Ces résultats sont tous exprimés en décinépers au-dessus d'un niveau constant qui correspond à la pression minimum nécessaire pour rendre audible un son pur de hauteur 800 p:s. (On a admis implicitement que le microphone avait une efficacité indépendante de la hauteur des sons).

On remarquera en particulier que, d'une machine à l'autre, la composition du bruit peut varier d'une façon considérable ; toutefois au-dessus de 6 000 p:s l'énergie est toujours négligeable.

C. — Application pratique

Une des dernières commutatrices de 3 000 kW livrées à la C. P. D. E. était entièrement blindée, la ventilation se faisant en circuit

fermé par circulation d'eau. Il était toutefois possible de dégager, à l'aide de portes, collecteur et bagues, ce qui anéantissait l'effet du blindage et permettait donc de le mesurer.

TABLEAU I. — *Effet du blindage d'une machine sur la nature du bruit qu'elle produit.*

	Limites de fréquence entre lesquelles le bruit était mesuré						
	90-200	200-400	400-800	800-1600	1600-3200	3200-6500	6400-10000
Ecart de niveau en décinépers entre la pression acoustique de la machine ouverte et de la machine blindée.	8	7,5	12	18	22	Bruit négligeable dans ces bandes	

Or, on voit sur le tableau ci-contre que ce blindage a, ainsi d'ailleurs qu'il était à prévoir, amorti principalement les sons de fréquence aiguë En particulier le bruit dû au collecteur s'est trouvé complètement étouffé.

A titre d'indication la réduction physiologique de bruit, mesurée à l'aide de l'appareil que nous décrirons, était de 11 décinépers, réduction qui est pratiquement très importante.

III. — MESURE DES BRUITS

Les mesures de bruits se font d'une façon objective ou subjective, selon qu'elles sont enregistrées directement sur un appareil, ou qu'elles résultent d'opérations effectuées par l'intermédiaire de l'oreille.

A. — Méthodes objectives de mesure de bruits

La première idée qui se présente à l'esprit, dès qu'il s'agit de mesurer des bruits, consiste à utiliser un ensemble composé d'un microphone, d'un amplificateur et d'un milliampèremètre à courant alternatif.

Or, ayant réalisé un tel ensemble et l'ayant placé successivement devant deux sources sonores : un klaxon et un sifflet, nous avons constaté que le milliampèremètre déviait trois fois plus pour le klaxon que pour le sifflet bien que le bruit produit par ce dernier avertisseur fût nettement plus gênant que l'autre.

Ce fait n'avait, comme nous allons le voir, rien de surprenant, car nous faisions abstraction complète des caractéristiques de l'audition ; aussi est-ce par un examen de ces dernières que doit logiquement commencer toute étude d'appareil de mesure de bruits. De ces caractéristiques je rappellerai seulement celles qui présentent pour nous le plus d'intérêt (1).

1° Caractéristiques fondamentales de l'audition

a) *Effet sélectif de l'oreille en fonction de la hauteur des sons.*

Pour qu'un son soit audible, il faut que sa pression efficace atteigne une valeur minimum appelée *seuil d'audibilité*. Cette pression varie

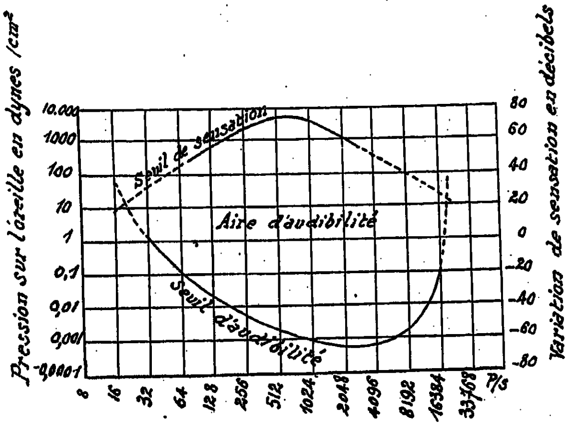


Fig 15. — Courbes limites de sensation en fonction de la hauteur des sons (d'après Fletcher).

dans de larges limites avec la hauteur des sons puisqu'à 1 000 p:s, elle est de 1/1 000 dyne/cm² et à 30 p:s de 1 dyne/cm² environ.

On pourrait croire, par suite, qu'il suffirait, pour reproduire les caractéristiques de l'oreille, d'intercaler dans un système de mesure sans distorsion un filtre qui affecterait à chaque fréquence un certain poids variant en raison inverse du seuil d'audibilité correspondant.

Or un tel dispositif n'aurait aucune valeur.

Si, en effet, nous augmentons progressivement la pression d'un son de hauteur déterminée, il arrive un moment où la sensation produite devient pénible, puis douloureuse et insupportable. Nous aurons alors atteint ce que l'on peut appeler le « *seuil de sensation* ». On voit sur

(1) Une étude très complète des caractéristiques de l'audition a été faite par Fletcher dans son livre *Speech and Hearing*.

la figure 15 que les variations de ce seuil se font en sens inverse de celles du seuil d'audibilité.

Les deux courbes ainsi tracées renferment une certaine aire dans laquelle se trouvent compris tous les sons perceptibles.

Que se passe-t-il à l'intérieur de cette aire ?

Si l'on peut admettre que tous les sons situés à leur seuil d'audibilité produisent, non pas la même sensation — terme qui serait impropre — mais ce que nous appellerons la même intensité physio-

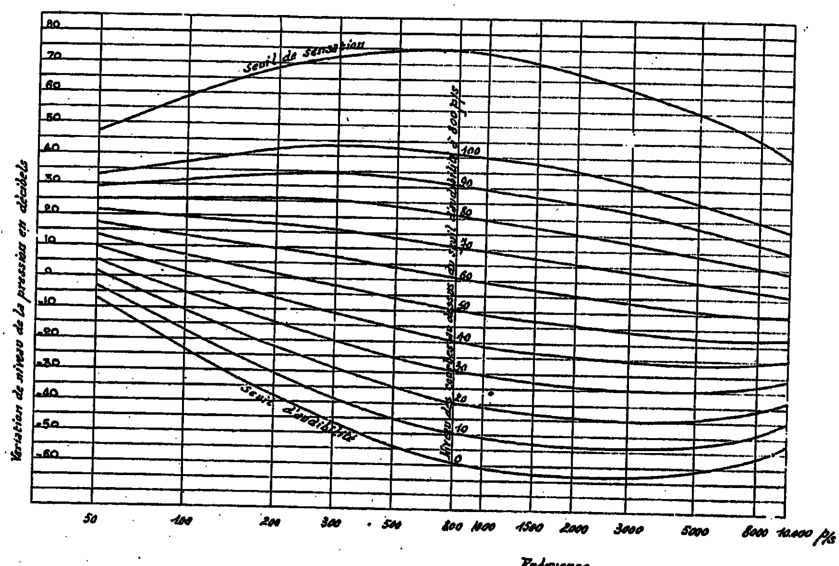


Fig 16. — Courbes d'égale intensité physiologique.

logique, il doit en être de même pour tous ceux qui sont situés à leur seuil de sensation, l'intensité physiologique se traduisant dans ce cas par l'effet de gêne produit. On conçoit donc qu'on puisse tracer dans cette aire une famille de courbes correspondant chacune à une même intensité physiologique et l'on voit que ces courbes changeront totalement d'allure suivant l'intensité considérée. L'une d'elles pourra, en particulier, être sensiblement horizontale, c'est-à-dire qu'à *la pression correspondante tous les sons produiront la même intensité physiologique quelle que soit leur hauteur.*

Ce fait s'est trouvé confirmé, comme le montre la figure 16, par des observations, très délicates d'ailleurs, faites aux Etats-Unis par Kingsbury et l'on voit en définitive que l'intensité physiologique d'un son de hauteur quelconque pourrait être représentée par le rapport entre son niveau au-dessus du seuil d'audibilité et la différence

de niveau existant entre ce seuil d'audibilité et le seuil de sensation (5).

Aucun appareil objectif de mesure de bruits ne pourrait par suite convenir et la réalisation de ce que certains ont osé qualifier « d'oreille artificielle » est un véritable mythe.

Mais s'il faut renoncer à l'idée de mesurer avec un même appareil des bruits d'origine, de nature et d'intensité très différentes, il est peut-être possible d'arriver à des résultats satisfaisants en se limitant à une catégorie déterminée de bruits; la solution du problème consistant alors à intercaler dans un système de mesure sans distorsion un filtre basé sur une courbe d'égale intensité physiologique dont le niveau serait d'autant plus élevé que le bruit moyen qu'il s'agit de mesurer devient plus intense.

Bien entendu, suivant qu'un bruit renfermerait un son pur sur lequel serait concentrée la quasi totalité de l'énergie sonore, ou une multitude de sons d'intensités très voisines, il y aurait théoriquement lieu de choisir des filtres différents, aussi une telle solution ne peut être qu'approchée et doit être soumise au contrôle de l'expérience.

Nous devons, par ailleurs, signaler que, dans de larges limites de fréquence — 600 à 4 000 p:s environ — les courbes d'égale intensité physiologique sont sensiblement parallèles ; dans ces limites il n'y a donc pas à s'occuper de l'effet sélectif de l'oreille.

b) *Pouvoir séparateur de l'oreille.*

Pour que l'oreille puisse séparer deux sons de même hauteur, il doit exister entre eux un écart relatif de pression minimum. De nombreuses études faites aux Etat-Unis et récemment en France par M. Canac ont montré que cet écart relatif restait sensiblement constant dans la zone entière d'audibilité.

C'est d'ailleurs ce fait qui a permis à Fechner d'énoncer la loi logarithmique bien connue qui lie les sensations aux excitations. Cette loi nous montre que ce qui intervient c'est, non la différence de pression de deux sons, mais la différence de niveau de ces deux pressions, différence qui s'exprime en décibels, en népers ou en phones.

Le pouvoir séparateur de l'oreille correspond en moyenne à 0,3 décibels ; il diminue quand le niveau du son au-dessus du seuil d'audibilité ainsi que sa hauteur tombent au-dessous d'une certaine limite.

---

(5) Les courbes de Kingsbury permettent de déterminer l'intensité physiologique relative de sons de hauteur différente et il est ainsi possible de traduire physiologiquement les résultats d'analyse des bruits.

c) *Changement de la nature du bruit suivant la distance à la source sonore.*

On voit sur la courbe 15 que la différence de niveau qui sépare le seuil de sensation du seuil d'audibilité est beaucoup plus faible aux basses fréquences qu'aux fréquences moyennes. Par suite, de deux bruits, l'un grave et l'autre aigu, également gênants à un endroit déterminé, celui qui est aigu restera plus longtemps audible que l'autre.

En réalité, comme par ailleurs tous les obstacles qui gênent la propagation du bruit ont une efficacité qui *généralement* croît d'une façon très notable avec la hauteur des sons, les sons aigus s'amortissent davantage que les sons graves ; aussi ces deux effets se trouvent-ils parfois contre-balancés.

d) *Effet de masque.*

Considérons un son pur de hauteur déterminée ayant un certain niveau au-dessus de son seuil d'audibilité et supposons qu'un autre son, de hauteur différente, soit émis en même temps que lui. Si l'on veut que ce dernier son soit audible en présence de l'autre, il faudra que son niveau atteigne une certaine valeur au-dessus de son seuil d'audibilité normal déterminé dans le silence ; cette valeur nous l'appelerons l'effet de masque.

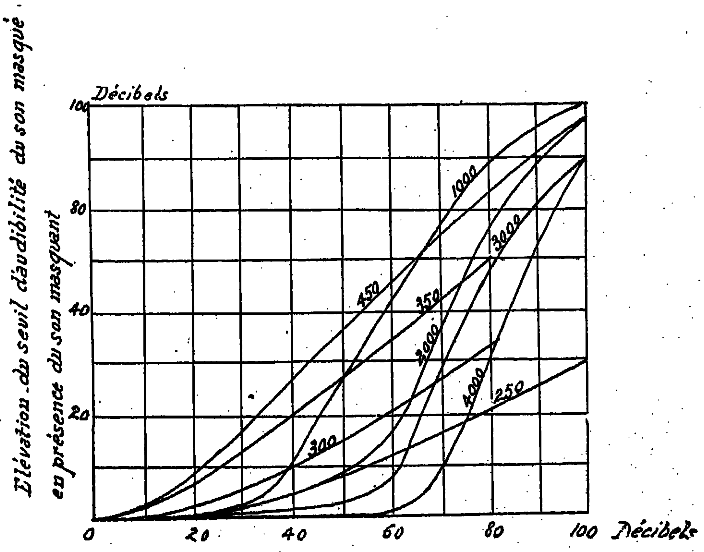
L'effet de masque a fait l'objet de nombreuses études et nous résumons sur la figure 17 quelques-uns des résultats obtenus aux Etats-Unis par Wegel et Lane.

Cette figure représente l'effet de masque produit par un son de hauteur fixe égale à 400 p:s et de niveau variable sur des sons de hauteurs différentes. On remarquera en particulier :

1° que l'effet de masque, ainsi que l'expérience courante le confirme d'ailleurs, dépend essentiellement de l'écart de hauteur qui existe entre le son masquant et le son masqué. Par exemple, lorsque le son masquant, de hauteur 400 p:s, est à un niveau au-dessus de son seuil d'audibilité de 60 décibels, l'effet de masque qu'il produit sur un son de hauteur 450 p:s, est de 48 décibels ; sur son de 2 000 p:s il tombe à 20 décibels et il devient nul à partir de 4 000 p:s, c'est-à-dire qu'on entendra alors distinctement ces deux sons, malgré que leur différence de niveau soit de 60 décibels et donc le rapport de leurs intensités de 10^6.

2° que l'effet de masque est plus prononcé pour les sons de hauteur supérieure à celle du son masquant que pour ceux de hauteur inférieure. Pour les premiers, il atteint une saturation dont la valeur est sensiblement indépendante de la hauteur du son masqué.

3° que l'effet de masque n'est généralement nullement proportionnel au niveau du son masquant. S'il s'agit, par exemple, d'un son masquant de hauteur 400 p:s et d'un son masqué de hauteur 4 000 p:s, il reste nul tant que le niveau du son masquant varie de 0 à 60 décibels, il devient égal à 30 pour 80 et à 70 pour 100 décibels.



Niveau du son masquant au-dessus de son seuil d'audibilité.

Fig. 17. — Effet de masque produit par un son de hauteur 400 p : s sur d'autres sons de hauteur variable.

Ces considérations, qui nous seront très utiles lorsque nous étudierons la méthode de mesure de bruits dite « Méthode de masque », nous les négligeons entièrement lorsque nous mesurons des bruits d'une façon objective.

c) *Proportionnalité de l'oreille.*

Nous enregistrons avec notre appareil de mesure des quantités proportionnelles à la pression sonore. Or, on a vérifié que, pour l'oreille, cette proportionnalité n'existait pas ; un tel fait se traduit lorsqu'il s'agit d'un son simple par l'apparition d'harmoniques et lorsqu'il s'agit d'un son complexe par celle d'harmoniques et de sons de modulation.

Comme l'importance relative de ces sons augmente avec l'intensité du son fondamental, la mesure d'un bruit doit devenir d'autant plus difficile que ce dernier est plus intense.

Toutes ces remarques sont évidemment de nature à discréditer les méthodes objectives de mesure de bruits.

Et pourtant l'expérience nous a montré que, principalement lorsqu'il s'agit de bruits complexes, auquel cas les effets précédents se détruisent mutuellement, on pouvait traduire d'une façon très satis-

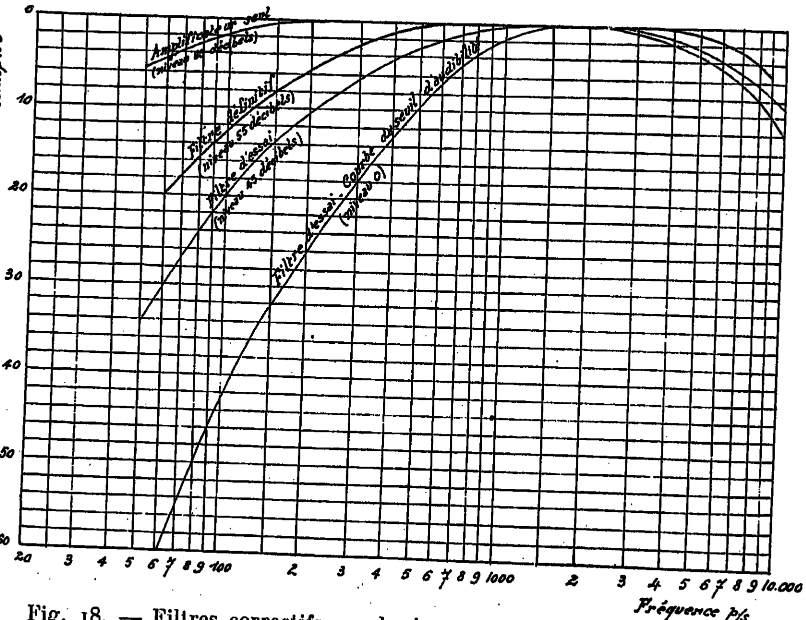


Fig. 18. — Filtres correctifs employés pour la mesure des bruits.

Ces courbes suivent d'assez près les courbes d'égale intensité physiologique de Kingsbury.

Le niveau de ces courbes au-dessus du seuil d'audibilité d'un son de hauteur 800 p:s se trouve porté sur les caractéristiques des filtres.

faisante, mais dans des limites déterminées, l'impression auditive, en tenant compte uniquement de l'effet sélectif de l'oreille et en intercalant par suite, dans un système de mesure sans distorsion, un filtre correctif convenablement déterminé.

2° Appareil de mesure des bruits.

Cet appareil, destiné à comparer entre eux les bruits produits par les groupes convertisseurs placés dans les sous-stations de la C. P. D. E., est le même que celui qui nous a servi à décomposer les bruits en bandes de fréquence, les filtres passe-bandes étant remplacés par

un filtre basé sur la courbe d'égale intensité physiologique passant par le niveau de 55 décibels au-dessus de son seuil d'audibilité d'un son de hauteur 800 p:s.

La mise au point et le contrôle de cet appareil ne pouvaient évidemment se faire qu'expérimentalement et notre façon de procéder fut la suivante : ayant choisi un certain nombre de machines dont l'intensité et la nature du bruit étaient aussi différentes que possible, nous en avons au préalable, établi un classement à l'oreille en considérant leur degré de gêne. Un tel classement s'effectuait d'une façon relativement aisée et était, de plus, peu variable d'une personne à l'autre.

Puis nous avons mesuré ces bruits avec différents filtres basés, soit sur la courbe du seuil d'audibilité, soit sur les courbes d'égale intensité physiologique de niveaux 45 et 85 décibels. Une décomposition en bandes de fréquence nous permettait, de plus, de suivre l'effet exact de ces filtres et, le cas échéant, de fixer notre choix.

TABLEAU N° 2. — *Influence du choix du filtre sur la détermination du niveau relatif de bruit de diverses machines.*

Caractéristiques de la machine	Observations relatives à la nature du bruit	Détermination du niveau du bruit en décinépers, au-dessus du seuil d'audibilité d'un son de hauteur 800 p:s		
		Filtre de 85 décibels	Filtre de 45 décibels	Filtre du seuil d'audibilité
Commutatrice de 1500 kW 300 t/mn	Bruit relativement faible; fréquences prépondérantes situées entre 300 et 800 p : s..	92,3	88,2	85,9
Groupe synchrone 3000 kW 375 t/mn	Bruit plus intense mais de nature voisine du précédent.	96,2	93,7	91,5
Commutatrice 3000 kW 375 t/mn	Renferme un son pur très intense de hauteur 130 p : s	101,2	93,8	90,5
Groupe asynchrone synchronisé 1500 kW 738 t/mn	Bruit nettement plus fort que les autres; renferme des sons très intenses situés aux environs de 2000 p : s.	106,7	105,8	104,7
Ecart entre les deux dernières machines	. . . .	5,5	12,0	14,2

Or, le tableau ci-dessus nous montre que lorsqu'on détermine la différence de niveau entre deux bruits — il ne peut être question évidemment que de comparaison de bruits et non de mesures absolues — celle-ci varie dans notre cas au maximum de 8 décinépers suivant le

filtre utilisé. Cet écart de 8 décinépers se produisait d'ailleurs lorsque les bruits apparaissaient à l'oreille et se révélaient à l'analyse comme étant de nature totalement différente, ainsi qu'on l'a constaté sur la figure 14.

Notre étude, qui a porté sur un nombre très important de machines, nous a montré.

1° Que le filtre de 85 décibels — courbe d'efficacité sensiblement horizontale — ne pouvait convenir.

2° Que le filtre du seuil d'audibilité coupait beaucoup trop les basses fréquences.

3° Que le filtre de 45 décibels était dans tous les cas en accord avec l'impression auditive.

4° Qu'il serait néanmoins préférable d'adopter un filtre de niveau 55 décibels, celui-ci conduisant d'ailleurs à des résultats peu différents du précédent.

L'écart maximum entre les bruits mesurés de la sorte au moyen du filtre de 45 décibels atteignait 30 décinépers. Un tel écart est très important car, alors que près de la machine la moins bruyante on pouvait causer sans élever le niveau de la voix d'une façon appréciable, le bruit le plus intense était difficilement supportable.

Quant à la précision obtenue à l'intérieur de la zone d'utilisation de cet appareil, elle dépend des 2 facteurs suivants :

1° Le facteur physique.

L'erreur qu'on peut commettre et qui proviendrait, en particulier, de l'instabilité du microphone ou de l'inégale répartition du bruit autour de la machine, ne dépasse pas, sauf de rares exceptions que nous examinerons à l'annexe de ce rapport, 1 décinéper.

2° Le facteur physiologique.

La précision obtenue est évidemment d'autant meilleure que les bruits que l'on compare sont de nature plus voisine. Dans les cas extrêmes envisagés, il semble qu'elle soit d'environ 2 décinépers.

On se rendra compte de la signification de ces 2 décinépers en se rappelant que, pour différencier d'une façon nette deux sons de même hauteur, leur écart de niveau doit être au moins de 0,5 décinépers.

En ce qui concerne les bruits qui nous intéressaient cet écart oscillait entre 1 et 2 décinépers suivant leur différence de nature.

Ceci nous amène à conclure — et les nombreuses mesures de bruit que nous avons faites par la suite l'ont confirmé — qu'il est possible de mettre au point un appareil de mesure de bruits qui nous

donne entière satisfaction puisqu'il traduit d'une façon fidèle l'impression recueillie par l'oreille.

Bien entendu, un tel appareil ne peut se concevoir que pour une catégorie de bruits déterminée — rappelons qu'il s'agissait, dans notre cas, de bruits produits par des machines électriques et dont le niveau variait entre 77 et 109 décinépers — et la comparaison de bruits entrant dans des catégories différentes (bruits de machines électriques, bruits de machines à écrire, bruits de rue) reste toujours délicate et même aléatoire. Ces comparaisons, que l'oreille effectue d'ailleurs difficilement, n'ont heureusement aucun intérêt et se présentent uniquement lorsqu'on désire établir, à titre documentaire, une sorte d'échelle de bruits, échelle qui couvre la zone entière d'audibilité s'étendant entre 0 et 150 décinépers et n'a de signification que si la valeur de chaque échelon est assez importante, c'est-à-dire d'une dizaine de décinépers. Un tel problème n'a par suite aucun rapport avec la mesure précise des bruits que nous envisageons.

L'appareil que nous avons réalisé se justifie davantage, certes, d'après les résultats auxquels il conduit que d'après des considérations d'ordre théorique, mais nous devons par ailleurs signaler que les méthodes objectives de mesure de bruit sont très utilisées actuellement et tendent à supplanter les méthodes subjectives dont nous verrons les nombreux inconvénients (6). Certaines d'entre elles ont même parfois reçu une consécration officielle et c'est par exemple de cette façon qu'après une étude sérieuse des autres solutions possibles, le Comité Consultatif International des communications téléphoniques à grande distance a décidé de mesurer l'effet produit par des forces électromotrices parasites sur l'intelligibilité des conversations téléphoniques, le filtre correctif ayant également été déterminé d'une façon expérimentale.

B. — Méthodes subjectives de mesure de bruits

Les deux reproches que l'on peut formuler à l'égard des méthodes objectives : leur défaut de généralité et leur justification *à posteriori*, ne sembleraient plus devoir se présenter si, au lieu de chercher à reproduire le fonctionnement de l'oreille, c'était cette dernière elle-même qui, à l'aide d'un appareil convenable, jugeait de l'effet du bruit.

(6) Ce fait ressort nettement des rapports présentés à ce sujet au Congrès international d'Électricité.

Il existe en réalité des méthodes subjectives de mesure de bruits ; elles se ramènent à deux types : la méthode d'égalité, appelée encore méthode de BARKAUSEN et la méthode de masque [7].

Nous allons les examiner successivement.

I. — MÉTHODE D'ÉGALITÉ.

Le principe de la méthode d'égalité consiste à comparer le bruit à étudier à un son pur dont on règle le niveau jusqu'à ce qu'on

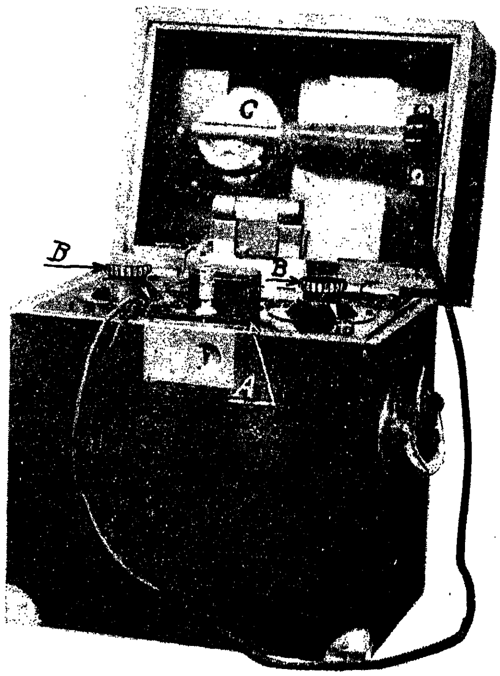


Fig. 19. — Appareil de mesure de bruits de Barkhausen.
A. — Buzzer.
B. — Atténuateur gradué en phones et dixième de phones
C. — Ecouteur téléphonique.

estime que, dans les deux cas, l'intensité physiologique ou, quand le bruit devient intense, l'effet de gêne, soit le même. On obtient de cette façon un renseignement qui est évidemment très intéressant.

Malheureusement, lorsqu'on essaye d'effectuer une telle comparaison, on se trouve devant des difficultés plus grandes encore que lorsqu'il s'agit de photométrie hétérochrome et à vrai dire on ne sait sur quelles bases l'établir.

(7) Nous ne parlerons pas de la méthode dite du « téléphone shunté » qui est actuellement, à juste raison, totalement abandonnée.

Après un certain entraînement que l'on acquérerait en mesurant des bruits de nature assez voisine, on peut certes arriver à une constance assez bonne et trouver même que cette opération est aisée mais, si l'on passe ensuite à un bruit de nature différente on se trouvera de nouveau dérouté.

Le caractère de généralité que nous espérions trouver dans cette méthode n'est donc nullement obtenu.

Notons, par ailleurs, qu'il est bien difficile de comparer un son pur à l'ensemble d'un bruit complexe émis par une machine et que l'on a toujours tendance à limiter cette comparaison à l'une des composantes du bruit, et plus spécialement à celle qui donne une impression de hauteur voisine du son de référence ; s'il s'agissait uniquement de comparer entre eux des bruits semblables, il y aurait évidemment tout intérêt à remplacer le son étalon par un bruit se rapprochant de ceux que l'on étudie.

Dans le domaine particulier qui nous intéressait, nous avons constaté, bien que toutes précautions aient été prises pour arriver à la précision la meilleure, que, lorsqu'on comparait au moyen de cette méthode les bruits émis par deux machines, leur différence de niveau pouvait varier de 0 à 10 ou même 15 décinépers suivant l'opérateur qui effectuait la mesure. Cette différence est évidemment considérable.

Il existe certes le palliatif classique auquel on a recours dans ces cas-là ; il consiste à multiplier le nombre des opérateurs et à établir ainsi une moyenne de leurs résultats mais l'on conçoit que devant les divergences qui précèdent, ce procédé soit plutôt médiocre.

Signalons toutefois que de telles divergences provenaient de ce que, par la force des choses, les comparaisons de bruits avaient été faites à des intervalles de temps assez longs (par exemple une ou deux journées). Si ces comparaisons avaient été plus rapprochées, l'équation personnelle eût été moins importante.

De plus, lorsque le bruit est très intense, les mesures deviennent un peu plus aisées, car on apprécie à ce moment-là quelque chose de tangible, qui est l'effet de gêne très net produit par le bruit.

Cette méthode, qui présente l'avantage de nécessiter un matériel très simple et qui est, il faut le reconnaître, assez attrayante *à priori*, a été très utilisée, notamment en Allemagne et en Angleterre, mais nous estimons qu'elle peut tout au plus servir à établir une de ces échelles de bruits dont il a été question plus haut et qu'il ne faut nullement espérer faire de cette manière des mesures sérieuses, sauf lorsque les bruits sont de nature assez voisine ; mais, dans ce cas pré-

cisément, la méthode objective conduit à des résultats immédiats et par ailleurs indiscutables, puisqu'il n'y a même pas lieu de se préoccuper outre mesure de l'effet sélectif sur l'oreille.

II. — Méthode de masque.

Dans la méthode de masque, on détermine l'élévation du seuil d'audibilité produite, sur un son pur ou sur un bruit, par le bruit à étudier. Cette élévation varie dans le même sens que le niveau du bruit et peut par suite servir à le caractériser.

Une telle mesure a d'ailleurs une signification pratique car, *dans*

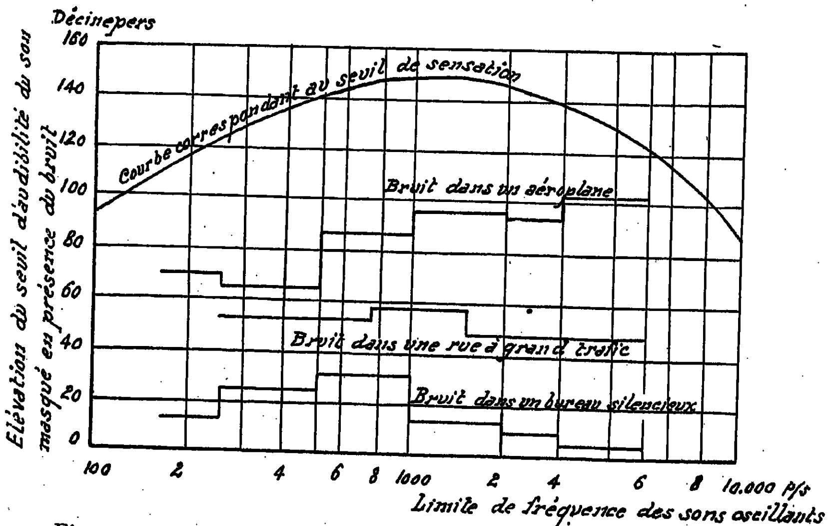


Fig. 20. — Détermination de l'effet de masque de divers bruits par l'utilisation de sons oscillants (d'après Steinberg.)

certains cas, les bruits nous gênent principalement parce qu'ils nous obligent à élever le niveau de la voix qui se trouve masquée par eux.

Mais nous avons vu que, lorsqu'il s'agissait de deux sons purs, l'effet de masque n'était pas proportionnel au niveau du son masquant et qu'il dépendait, de plus, de l'écart de hauteur existant entre ces deux sons.

Pour un bruit, le même défaut de proportionnalité devrait exister et nous avons en effet constaté, sur des machines très bruyantes, que l'effet de masque restait sensiblement constant bien qu'objectivement le niveau du bruit augmentât et qu'il en fût d'ailleurs de même de la gêne qui en résultait.

Par ailleurs, l'effet de masque relatif produit par deux bruits sur

un son pur dépend essentiellement de la répartition de leur énergie dans le spectre sonore.

Les Américains ont tourné la difficulté en utilisant des sons particuliers qu'ils appellent des « Warbling Tones », et qui sont obtenus en faisant varier d'une façon continue la hauteur d'un son pur entre deux limites déterminées.

L'appareil qu'ils utilisent à cet effet se compose de disques sur lesquels ces sons oscillants ont été enregistrés, d'un pick-up, d'un amplificateur, d'un atténuateur et d'un écouteur téléphonique.

Certains de leurs résultats sont reproduits sur la figure ci-contre. On y remarquera en particulier qu'on peut trouver, entre deux bruits, un effet de masque qui, suivant les limites du son oscillant considéré, varie de 11 à 57 décinépers.

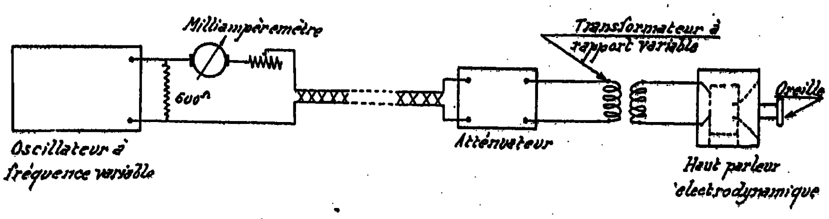


Fig. 21. — Schéma du dispositif permettant de déterminer l'effet de masque des bruits.

Il est vrai qu'il s'agissait, dans ce cas, de bruits d'origine et de nature très différentes, aussi avons-nous cru bon d'expérimenter une telle méthode en nous limitant à notre champ d'applications particulier ; mais nous voyons qu'ici encore nous n'arriverons pas davantage au caractère de généralité que nous recherchions.

Dans l'appareil que nous avons réalisé, les sons oscillants étaient produits par un oscillateur à interférences, un condensateur rotatif se trouvant intercalé dans un des circuits oscillants H. F. ; le courant de cet oscillateur arrivait à un haut-parleur électrodynamique relié à l'oreille par un tube convenable et pouvait être réglé au moyen d'un atténuateur. Des orifices étaient percés dans ce tube afin de permettre l'arrivée à l'oreille du bruit à étudier, l'autre oreille étant bouchée.

Quant aux frontières de chacun de ces sons oscillants, elles étaient les mêmes que celles que nous avions adoptées pour effectuer la décomposition du bruit en bandes de fréquences.

Nous avons ainsi pu nous rendre compte que la recherche du seuil d'audibilité d'un son en présence d'un bruit était incomparablement

plus aisée que la comparaison de l'intensité physiologique d'un son pur et d'un bruit, cette recherche devenant toutefois assez pénible quand le bruit est très intense. Pendant une série de mesures, on reste généralement très constant — écarts de 2 décinépers environ —

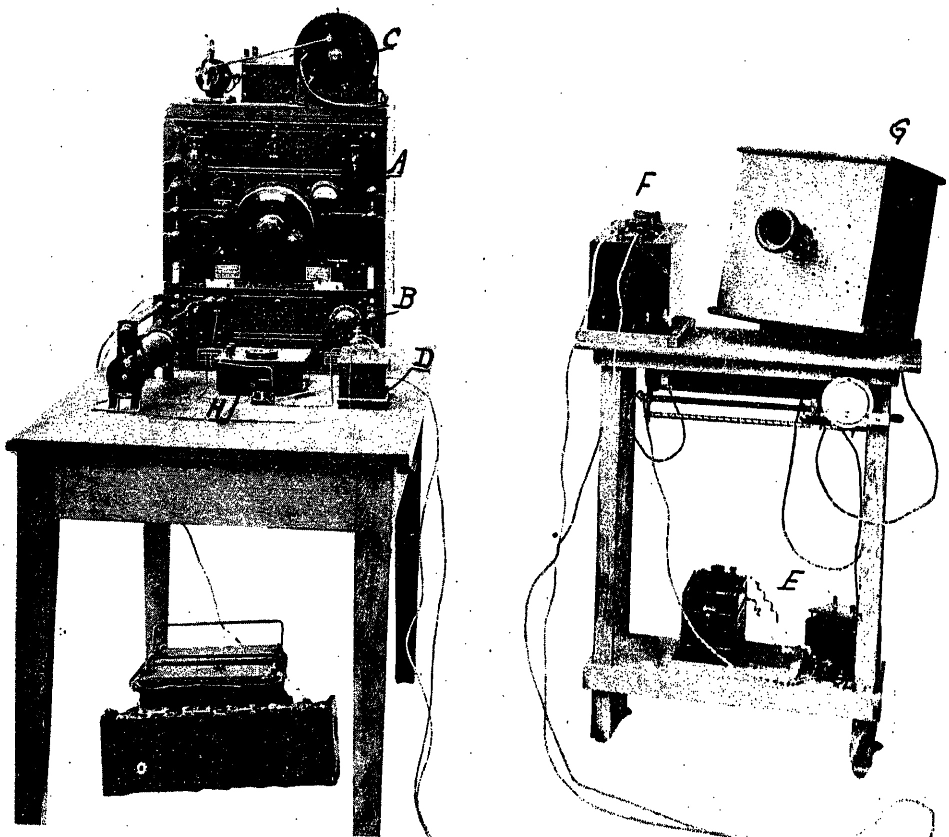


Fig. 22. — Appareil de mesure de bruits par une méthode de masque.

A. — Oscillateur à fréquence variable.
B. — Amplificateur de l'oscillateur.
C. — Condensateur tournant.
D. — Résistance fixe.
E. — Transformateur.
F. — Atténuateur.
G. — Haut-parleur.
H. — Milliampèremètre.

mais lorsqu'on effectue les mêmes mesures après un intervalle de temps assez long — quelques jours par exemple — on est surpris de constater qu'une variation très forte — 5 à 10 décinépers — a pu se produire. Cette variation est généralement systématique, mais peut changer de sens suivant le son considéré ; aussi l'effet de masque

moyen que nous définissons, d'une façon arbitraire il est vrai, par la moyenne des effets de masque produits sur chacun des sons oscillants variait-il au maximum de 4 décinépers.

D'un individu à l'autre, l'effet de masque produit sur l'un quelconque des sons oscillants variait au maximum de 15 décinépers et l'effet de masque moyen de 4 décinépers.

Compte tenu de ces 2 facteurs et les mesures étant faites au moyen de 4 opérateurs, la comparaison de l'effet de masque moyen de deux machines comportait une imprécision qui ne dépassait pas 2 décinépers.

Un tel résultat n'était évidemment obtenu que grâce à la loi des moyennes (24 mesures étaient effectuées en chacun des 3 points où l'on se plaçait) ce qui conduit à une opération très longue.

Un avantage de l'emploi des sons oscillants réside dans le fait que, par suite de leur caractère spécial, on les distingue nettement du bruit des machines, tandis qu'il est très difficile de déterminer le moment précis où s'éteint un son pur, car on arrive toujours à déceler, dans le bruit, un son produisant la même impression de hauteur.

Signalons, enfin, que selon qu'on détermine le seuil d'audibilité d'un son en procédant par diminution ou par augmentation du courant, il se produit un écart systématique assez important (5 décinépers environ).

Tableau III. — *Relation entre l'effet de masque et la répartition de l'énergie sonore de deux machines dont les bruits étaient très différents.*

	Limites de fréquence						
	90-200	200-400	400-800	800-1600	1600-3200	3200-6400	
Différence de niveau en décinépers des pressions sonores.	8,8	11	11,5	16	22,5	15,2	Ecart de niveau du bruit total mesuré avec un filtre de 45 décibels: 16,6
Différence de niveau en décinépers de l'effet de masque. . .	1[illegible],7	10,5	14,9	15,2	21,5	15,8	Ecart de niveau de l'effet de masque moyen: 15,2

Il nous reste à examiner l'influence de la répartition de l'énergie du bruit. Cette influence était facile à préciser, car il suffisait de comparer les mesures de masque aux décompositions en bandes de fréquence que nous avions effectuées d'une façon objective. Nous avons ainsi constaté, comme le tableau ci-contre en fait foi, que si nous

comparons entre eux deux bruits, la différence de niveau de la pression sonore dans chaque bande est en général assez voisine de l'effet de masque correspondant, mais varie cependant davantage avec la fréquence que ce dernier.

Des mesures de masque peuvent donc donner une idée — mais une idée seulement — de la répartition relative de l'énergie sonore produite par des machines différentes.

On remarquera de plus que, pour les machines précédentes, l'écart d'effet de masque varie suivant ces limites du son oscillant entre 11

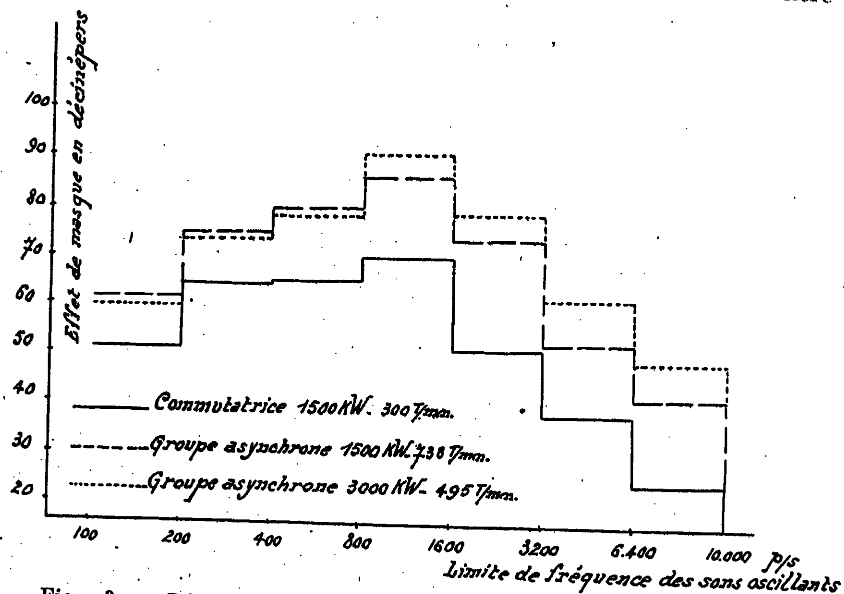


Fig. 23. — Détermination de l'effet de masque de diverses machines.

et 22 décinépers, mais qu'en se rapportant à l'effet de masque moyen, on arrive à un résultat très voisin de celui qu'on obtient en mesurant les bruits d'une façon objective.

Nous verrons qu'une telle concordance n'est nullement accidentelle et ceci nous amène à conclure que la méthode de masque peut être envisagée pour mesurer des bruits dont l'intensité ne dépasse pas une certaine limite, mais que, comme toutes les méthodes subjectives, elle entraîne une mise en œuvre particulièrement laborieuse dès qu'on désire aboutir à une précision d'environ 2 décinépers.

C. — Comparaison entre les diverses méthodes de mesure de bruits

Nous venons d'examiner successivement une méthode objective et deux méthodes subjectives de mesure de bruits; à chacune de ces mé-

thodes peuvent être opposées de nombreuses critiques, soit que les hypothèses sur lesquelles elles sont basées soient partiellement erronées, soit qu'on rencontre de sérieuses difficultés dans leur emploi soit enfin que l'interprétation de leurs résultats laisse place à un certain arbitraire.

Il était évidemment du plus haut intérêt de comparer les résultats que donnerait l'emploi simultané de ces trois méthodes. Une telle comparaison se trouve portée au tableau IV.

Les chiffres qui y sont indiqués représentent les quantités suivantes :

1° Pour la méthode objective : le niveau du bruit en décinépers au-dessus du seuil d'audibilité dans le silence, d'un son de hauteur 800 p:s.

2° Pour la méthode de masque : la moyenne arithmétique de l'effet de masque produit par le bruit sur chacun des sons oscillants considérés.

3° Pour la méthode de BARKAUSEN : le niveau au-dessus du seuil d'audibilité dans le silence d'un son à 800 p:s. produisant la même intensité physiologique que le bruit.

Toutes ces mesures sont donc rapportées au même zéro qui est le seuil d'audibilité dans le silence.

Ceci posé, on remarquera d'abord que le niveau de ces bruits est très élevé et que, par ailleurs, l'effet de masque moyen reste toujours d'environ 30 décinépers inférieur au niveau de bruit déterminé par la méthode de BARKAUSEN ou la méhode objective.

En ce qui concerne la détermination de la différence de niveau de bruit de plusieurs machines nous voyons :

1° Que dans la zone où la comparaison a été effectuée d'une façon complète, la différence de niveau maximum entre les bruits des machines est de 17,5 décinépers avec la méthode de masque, de 20,6 décinépers avec la méthode objective et de 25 décinépers avec la méthode de BARKAUSEN.

Un tel fait n'a rien de surprenant car, pour la méthode de masque, il se produit une saturation quand les bruits deviennent très intenses ; quant à la méthode de BARKAUSEN, le son de référence étant situé dans la zone de sensibilité maximum de l'oreille (800 p:s), il en résulte qu'en affaiblissant un bruit d'une certaine quantité, l'affaiblissement correspondant du son du BARKAUSEN doit être plus important. Cela revient uniquement à changer la valeur de l'unité de bruit.

2° Dans une zone de 31 décinépers, la méthode de masque ne pré-

Comparaison de diverses méthodes de mesure de bruits.

Sous-stations	Caractéristiques des machines	Niveau de bruit en décinépers au moyen des méthodes			Ecart de niveau de bruit entre		Ecarts par rapport à la moyenne entre		Moyenne des écarts entre la méthode objective et les 2 méthodes subjectives
		objective	de masque	de Barkausen	la méthode objective et la méthode de masque	la méthode objective et la méthode de Barkausen	la méthode objective et la méthode de masque	la méthode objective et la méthode de Barkausen	
Beaubourg	Groupe d'équilibre.	77,5	45,4		32,1		+ 0,3		
Vendôme	Groupe d'équilibre.	81,7	49		32,7		+ 0,9		
Saint-Roch	Commutatrice 1500 kW 300 t/mn	88,2	56,4	93	31,8	— 4,8	0	+ 1,1	+ 0,5
Bondy	Commutatrice 2000 kW 375 t/mn	92,6	63,3	97	29,3	— 4,4	— 2,5	— 2,5	— 0,7
Trudaine	Synchrone 3000 kW 375 t/mn. .	93,7	64	97	29,7	— 3,3	— 2,1	+ 2,6	+ 0,2
Trudaine	Commutatrice 3000 kW 375 t/mn	93,8	64,2	97	29,6	— 3,2	— 2,2	+ 2,7	+ 0,2
Bondy	Asynchrone compensé 1500 kW 745 t/mn.	101	70,1	109	30,9	— 8	— 0,9	— 2,1	— 1,5
Bondy	Synchrone 3000 kW 500 t/mn	102,6	71,7	105	30,9	— 2,4	— 0,9	+ 3,5	+ 1,3
Trinité	Asynchrone compensé 3000 kW 495 t/mn	103,9	71,2	109	32,7	— 5,1	+ 0,9	+ 0,8	+ 0,8
Saint-Roch	Asynchr. synchronisé 1500 kW 738 t/mn	105,8	71,6	115	34,2	— 9,2	+ 2,4	— 3,3	— 0,5
Saint-Roch	Asynchr. synchronisé 2250 kW 428 t/mn	106,6	71,1	118	35,5	— 11,4	+ 3,7	— 5,5	— 0,9
Beaubourg	Asynchrone compensé 3000 kW 495 t/mn	108,8	73,9	116	34,9	— 7,2	+ 3,1	— 1,3	+ 0,9
Ecart maximum de niveau de bruit, les 2 premières machines exceptées.		20,6	17,5	25			+ 3,7 — 2,5	+ 3,5 — 5,5	+ 0,9 — 1,5

Nota. — Les machines sont placées dans un ordre de bruit croissant basé sur des appréciations à l'oreille.

sente par rapport à la méthode objective que des écarts de ± 3 décinépers et, si nous excluons les dernières machines très bruyantes, nous arrivons, dans un domaine de 26 décinépers, à une concordance de ± 1,7 décinépers.

3° Entre la méthode objective et la méthode de Barkausen, il se produits des écarts de ± 4,5 décinépers, écarts qui se réduisent à ± 3 décinépers dans le cas de machines peu bruyantes ; mais nous voyons qu'avec la méthode Barkausen on ne suit nullement le classement établi à l'oreille.

4° Enfin, si nous comparons la méthode objective à la moyenne des résultats obtenus au moyen des méthodes subjectives, nous constatons cette fois que l'écart maximum est de ± 1,2 décinépers.

Une telle concordance, surprenante au point de vue théorique, et que d'autres mesures ont entièrement confirmée, est évidemment en l'honneur de la méthode objective que nous avions déjà jugée satisfaisante par ailleurs.

La méthode objective s'impose lorsqu'on désire obtenir des résultats précis : elle nécessite, il est vrai, pour chaque problème, une mise au point préalable, mais nous avons vu que le domaine d'utilisation d'un appareil basé sur ce principe était assez étendu et, d'autre part, cette mise au point pourra être grandement facilitée par les résultats antérieurement acquis dans un domaine différent.

Si, toutefois, on ne pouvait mettre au point une semblable méthode, ou si on avait à comparer entre eux des bruits de nature totalement différente, la méthode de masque pourrait dans ce cas être utilisée.

CONCLUSION

Nous voyons que, malgré toutes les difficultés d'ordre théorique auxquelles nous nous heurtons, nous avons néanmoins le moyen de connaître la nature des bruits et d'en mesurer l'effet physiologique.

Il est ainsi possible aux constructeurs de déterminer l'origine exacte des bruits de leurs machines et d'étudier rationnellement les dispositifs propres à en diminuer l'intensité.

L'exploitant pourra étudier de la même façon l'atténuation du bruit transmis à l'extérieur.

Enfin, il apparaît, à l'heure actuelle, nettement possible d'ajouter aux garanties que l'on considérait jusqu'à présent dans le fonctionnement des machines une autre concernant le bruit qu'elles produisent ; la façon de procéder la meilleure nous paraît être de choi-

sir dans ce cas une machine de référence de caractéristiques peu différentes de celle qu'il s'agit de recevoir. La mesure des bruits reste certes assez délicate, mais elle peut conduire à une précision largement suffisante eu égard aux caractéristiques de l'audition.

ANNEXE

Influence du local où se trouve placée une machine sur l'intensité, la nature et la répartition du bruit qui en émane

Si on désirait connaître la nature et l'intensité propre du bruit d'une machine, il faudrait éliminer l'influence du local où elle se trouve placée et, pour cela, effectuer ces mesures dans une chambre sans réflexion.

Et pourtant, dans bien des cas, on se verra obligé de mesurer et d'analyser le bruit d'une machine dans ses conditions normales d'utilisation — pour l'exploitant, seules ces mesures présentent même de l'intérêt — et, qui plus est, de comparer entre elles des machines qui seront situées, soit dans un même local mais à des emplacements différents, soit dans des locaux différents.

Dans ce cas, il est intéressant de connaître l'influence du local sur l'intensité, la nature et la répartition du bruit de la machine et c'est cette influence que nous allons examiner.

1° Supposons que notre bruit se réduise à un son pur. Sabine a montré que l'intensité de ce son variait en raison inverse de la quantité $\Sigma a_h s$. a_h désignant le coefficient d'absorption à la hauteur h de chaque matériau de surface s placé dans la salle. (Par définition $a = 1$ pour une fenêtre ouverte de surface égale l'unité). Or, comme a oscille, à 512 p:s, entre 0,78 pour du feutre de 25 mm d'épaisseur et 0,025 pour de la brique, et qu'il varie de plus notablement avec la hauteur des sons, on voit que l'intensité et la nature du bruit sont essentiellement fonction du local.

C'est, d'ailleurs, sur un tel fait que l'on se base parfois pour réduire le bruit d'une machine et nous sommes arrivés dans cette voie à des résultats intéressants (réduction d'environ 10 décinépers).

Il faut toutefois signaler que les conditions d'installation de machines semblables sont généralement très voisines et, en ce qui nous concernait par exemple, l'ordre de grandeur des variations du niveau de bruit provenant de ce fait n'était guère que de 1 à 2 décinépers.

Il n'en reste pas moins vrai qu'un constructeur pourrait difficile-

ment déduire de mesures effectuées à sa plate-forme d'essais le bruit réel que ferait une machine une fois installée, à moins qu'une étude préalable ne lui ait indiqué la correction qu'il y a lieu d'adopter.

2° Les dimensions et les formes du local peuvent être telles que celui-ci entre en résonance sur une des fréquences du bruit.

Si le bruit est simple, un tel cas a peu de chances de se produire; s'il est très complexe le niveau du bruit ne change guère et seule se trouve modifiée sa composition.

3° Les nombreuses surfaces réfléchissantes situées dans un local troublent profondément la répartition du bruit, ainsi qu'on s'en rendra compte sur la figure 24.

Pour cette raison, nous croyons indispensable, lorsqu'on désire mesurer le bruit d'une machine, de rester dans son voisinage immédiat et de faire une série de mesures autour d'elle. On choisira la distance exacte de façon que le bruit ne subisse pas de variations trop fortes d'un point à un autre.

Il ne faut d'ailleurs pas s'exagérer l'influence de cette question car, pratiquement, l'intensité du bruit est loin de varier suivant la loi théorique de l'inverse du carré de la distance à la source sonore, ainsi qu'on le voit sur la figure 24 et, selon que nous opérions contre le bâti d'une machine ou à une distance de 2 m de celui-ci, la réduction du bruit moyen était toujours comprise entre 1 et 2 décinépers (8).

On verra également, sur la figure 24, les variations que peut subir la nature d'un bruit; ces variations sont généralement assez faibles, mais on constate néanmoins qu'en s'éloignant de la machine, les fréquences aiguës sont plus amorties que les fréquences graves, par suite de l'absorption croissante des matériaux avec la hauteur des sons.

Dès qu'on passe à l'extérieur de la salle et bien que, dans notre cas,

(8) Le bruit moyen d'une machine était défini de la façon suivante : nous tracions un rectangle ou, si nécessaire, une figure quelconque suivant, à une certaine distance du bâti, le contour de la machine et faisions le long de cette figure n mesures à la hauteur de l'arbre (axe de symétrie).

Soit p la pression (corrigée au moyen du filtre) en un point quelconque. La pression moyenne est :

$$\sqrt[2]{\frac{\Sigma p^2}{n}}$$

et le niveau moyen en décinépers de :

$$10 \log_e \sqrt[2]{\frac{\Sigma p^2}{n}} + \text{constante}.$$

Près du bâti d'une machine on relevait des variations de niveau qui, généralement, ne dépassaient pas 5 à 6 décinépers.

S'il s'agissait de comparer entre elles des machines d'encombrement différent, les figures étaient tracées de telle sorte que la surface qu'elles renfermaient restait sensiblement constante et les points choisis autant que possible en des positions homologues.

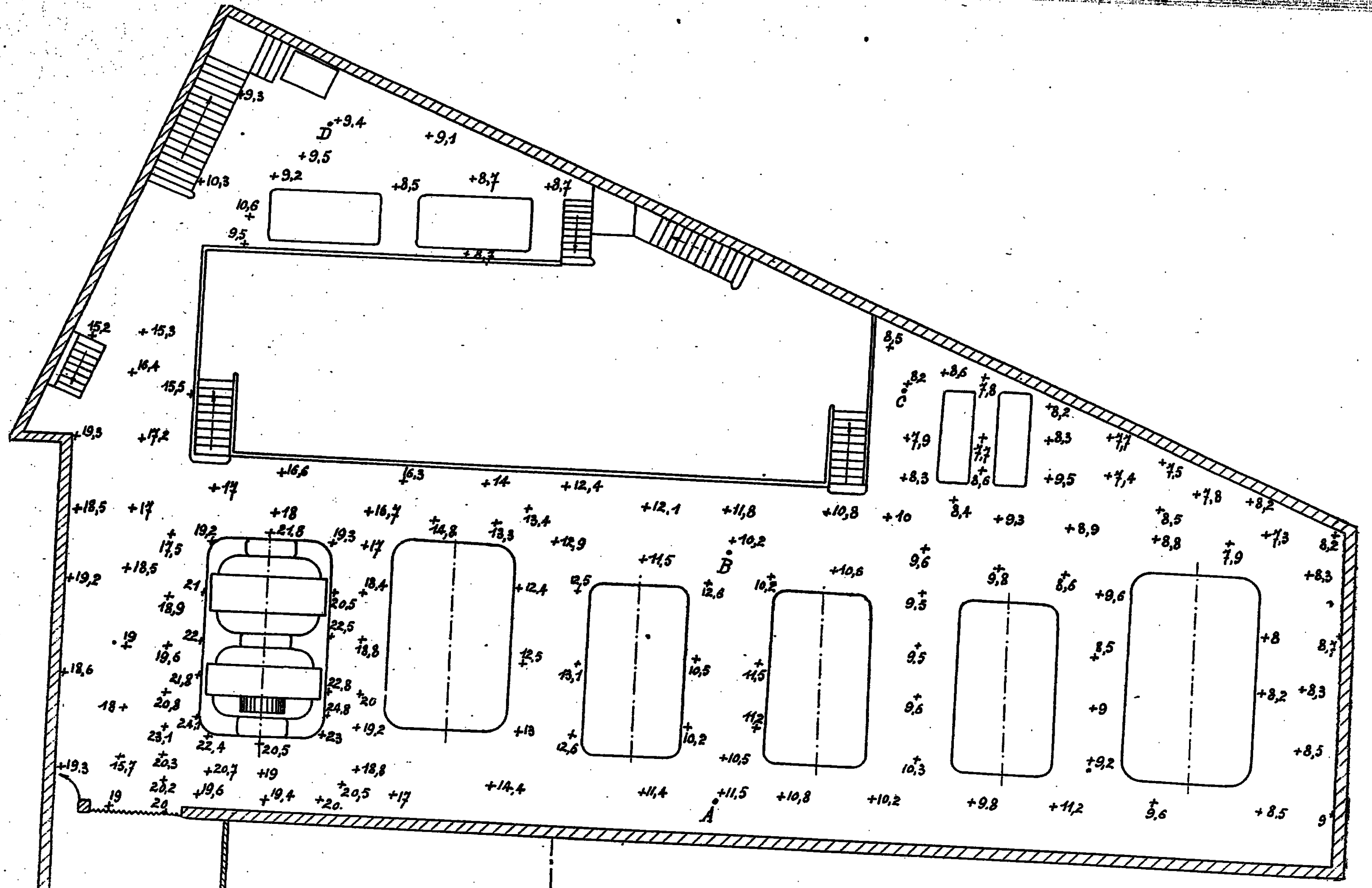


Fig. 24. — Répartition du bruit dans la sous-station où se trouve placée une machine.

Groupe synchrone 3 000 kW 375 t : mn.

Les chiffres indiquent la variation en décinépers de la pression efficace du bruit de la machine.

Toutes les mesures ont été faites à la hauteur de l'arbre.

Les variations de nature du bruit se trouvent portées au tableau IV.

la fermeture fut constituée par un simple rideau de fer, la réduction de bruit est très importante et les sons aigus sont nettement plus amortis que les sons graves.

4° Si, dans un bruit, un son pur domine, il peut donner lieu à des ondes stationnaires.

Quand ces ondes stationnaires sont régulières, (machine de dimensions faibles par rapport à celles du local, peu d'obstacles) il est possible d'en faire abstraction en traçant la courbe moyenne de variation de pression (cette courbe serait une hyperbole dans le cas de l'espace infini). Quand elles ne sont pas régulières, la correction devient moins aisée.

Ces ondes stationnaires peuvent entraîner des variations de pression qui sont de l'ordre de 10 décinépers.

TABLEAU IV. — *Variation de nature du bruit dans la sous-station.*

	Niveau de bruit en décinépers au-dessus d'un zéro arbitraire						
	Total	Bande 100-200	Bande 200-400	Bande 400-800	Bande 800-1600	Bande 1600-3200	Bande 3200-6400
Bruit moyen autour de la machine	18	9	6	11,3	10	8	2
Différence de niveau de bruit en A	— 6,5	4,3	— 5,3	— 4,8	— 4,4	— 8,2	— 9,8
» » » B	— 7,8	— 7	—13,5	— 7,5	— 8,9	—11,9	—14,8
» » » C	— 9,8	10	— 8	— 8	— 8,4	—11,4	—14,8
» » » D	— 8,6	— 4,8	— 6,6	— 6,5	— 9,4	—10,9	—14,3
» » en E portes fermées	—17,6	—11,5	—14,5	—16	—18,4	—19,4	—19,3
» » en E portes ouvert^{es}	— 4,9	— 2	4,5	— 3,8	— 6,6	— 9,2	— 9,3
» » en F portes fermées	—20,3	—15,4	—17	—19	—20,4	—20,9	—20,1
» » en F portes ouvert^{es}	—10	— 6,6	— 9,5	— 8	— 9,3	— 8,9	— 9,3

5° Les ondes stationnaires se déplacent parfois continuellement. Ce cas, assez rare il est vrai, s'est en particulier présenté pour la machine qui renfermait un son pur très intense (analyse du bruit en figure 10) de hauteur 900 p:s.

On voit, sur la figure 25, que la pression subissait des variations continuelles et assez lentes, atteignant une dizaine de décinépers. On aurait pu, certes, diminuer ces variations en amortissant l'appareil de mesure d'une façon convenable et déterminer encore dans ce cas une pression efficace, mais celle-ci ne saurait traduire l'effet physiologique particulièrement désagréable produit par un tel bruit et son niveau, assez difficile à définir, devrait, à notre avis, être choisi au voisinage immédiat du maximum observé sur la figure 25.

Il est bien évident que, lorsqu'il se produit ainsi des ondes stationnaires, la mesure et l'analyse des bruits sont rendues très délicates, aussi, s'il s'agissait d'étudier sérieusement les dispositifs constructifs propres à amener une réduction de bruit, il serait très re-

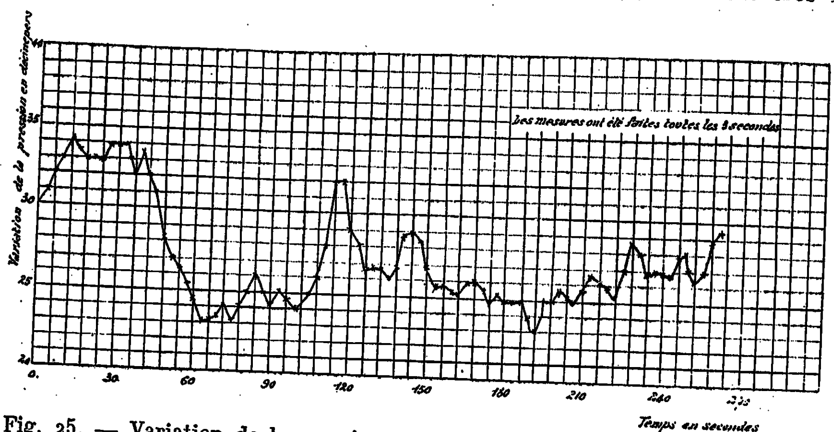


Fig. 25. — Variation de la pression efficace du bruit en fonction du temps en un point déterminé de la sous-station où était placé le groupe. Groupe asynchrone compensé de 3 000 kW tournant à 495 t:mn.

commandable de placer la machine dans une chambre sans réflexion.

De telles chambres peuvent être réalisés en ayant recours à des matériaux *très absorbants placés judicieusement*.

BIBLIOGRAPHIE

Acoustique générale

Bouasse. — Acoustique.

David. — L'électro-acoustique.

Sabine. — Selected Papers on Acoustics (Oxford University Press 1922).

Steward et Lindsay. — Acoustics (New-York).

Caractéristiques de l'audition

Birnbaum. — Sensibilité de l'oreille en fonction de la hauteur des sons. *Annalen der Physik*, vol. 49, p. 201, 1916.

Baron. — Principes généraux d'acoustique et leur application à l'étude des bruits. *Bulletin de la C. P. D. E.* Sept.-Octobre 1931.

Canac. — Mesure des intensités sonores par la méthode des scintillations. *Le journal de Physique*. Février 1931.

Fletcher. — Speech and Hearing (Londres). 1928.

Fletcher. — Mesures physiques concernant l'audition. *Journal of the Franklin Institute*. Septembre 1923.

Fletcher. — Théorie de l'audition. *Journal of the acoustical Society of America*. Avril 1930.

Fletcher. — Caractéristiques physiques de la parole, de la musique et des bruits. *Western Electric Company reprint* B-94-1. Octobre 1924.

Fletcher et Steinberg. — Intensité physiologique de sons complexes. *The Physical Review.* Septembre 1924.

Fletcher et Wegel. — Méthodes de mesures audiométriques et leurs applications. *The transaction of the American Laryngological, rhinological and otological Society.* 1922.

Kingsbury. — Comparaison directe de l'intensité physiologique de sons purs. *The physical Review.* Avril 1927.

Knudsen. — Sensibilité de l'oreille. *The physical Review*, vol. 21, p. 84. 1923.

Riesz. — Pouvoir séparateur de l'oreille en intensité pour des sons purs. *The physical Review.* Mai 1928.

Snow. — Fréquences audibles existant dans la musique, la parole et les bruits. *The Journal of the acoustical Society of America*, vol. III. Juillet 1931.

Steinberg. — Relation entre l'intensité physiologique d'un son complexe et ses caractéristiques physiques. *The physical Review.* Octobre 1925.

Wegel et Lane. — Phénomène de masque. *Western Electric Company reprint* B-58-1. Mars 1924.

Mesure des bruits

Abbott. — Spécifications relatives à la mesure des bruits. *Power.* Avril 1932.

Abbott. — Mesure des bruits produits par des trains d'engrenage. *Journal of the Acoustical Society of America.* Avril 1932.

Bailey. — Considérations sur la mesure du bruit des machines. *Electrical Engineering.* Mai 1932.

Baron. — Mesures subjectives des bruits. *Bulletin de la C. P. D. E.* Avril et Mai 1932.

Chavasse. — Rapport sur les bruits et leur mesure. *Bulletin de la Société française des Electriciens.* Février 1932.

Davis. — Mesures du bruit et son atténuation. *Journal of the royal aeronautical Society.* Août 1931.

Galt. — Mesure de l'effet de masque des bruits. *The Journal of the acoustical Society of America.* Octobre 1929.

Galt. — Résultats des mesures des bruits de rue. *The Journal of the acoustical Society of America.* Juillet 1930.

Lubowsky. — Méthode de mesure de bruits. *A. E. G. Progress* (Berlin, juin 1926).

Marvin. — Détermination de l'effet physiologique des bruits. *The Journal of the acoustical Society of America.* Janvier 1930.

Hecht, Meyer et Tendelenburg. — L'utilisation de l'électricité pour la lutte contre le bruit. Rapport présenté au Congrès International d'Electricité de Paris, 1932 (12e Section, rapport nº 7).

Hanna, Marvin et Wolf. — Recherches et mesures sur le bruit aux Etats-Unis. Rapport présenté au Congrès International d'Electricité de Paris, 1932 (12e Section, rapport nº 7 *bis*).

Snook. — Mesure du bruit des automobiles. *The Journal of the Society of Automotive Engineers.* Juillet 1925.

X. — City Noise. *Noise Abatement Commission*, New-York-City. 1930.

Steinberg. — Mesure de bruits. *Electrical Engineering.* Janvier 1931.

Tucker. — Mesure de bruits dans les immeubles. *The journal of the acoustical Society of America.* Juillet 1930.

Williams et Curdy. — Mesure de bruits au point de vue téléphonique. *The journal of the american Institute of Electrical Engineers.* Septembre 1930.

Analyse des bruits

Brillouin et Lévy. — Montage à réaction indépendant de la fréquence. *Génie Civil.* 23 avril 1932.

Churcher et King. — Analyse des bruits de machines électriques. *The journal of the Institution of Electrical Engineers.* Janvier 1930.

Foltz Delasso. — Analyse des bruits produits par les avions en vol. *The journal of the acoustical Society of America.* Juillet 1931.

Gurtzmacher. — Enregistrement automatique de l'analyse de sons complexes. *Electrische Nachrichten Technik.* Décembre 1927.

George. — Analyse et réduction des bruits produits par des transformateurs de puissance. *Electrical Engineering.* Mars 1931.

Gastner. — Analyse de bruits. *Electrical Engineering.* Mai 1931.

Graham. — Détermination des bruits magnétiques dans les moteurs synchrones. *Electrical Engineering.* Mai 1931.

Landeen. — Appareil d'analyse de sons complexes. *Bell System Technical Journal.* Avril 1927.

Lubeke. — Analyse des bruits d'un bateau. *Zeitschrift für Technische Physik,* nº 9, p. 378. 1929.

Meyer. — Analyse automatique de sons complexes. *Electrische Nachrichten Technick,* S-338-403. 1928.

Moore et Curtis. — Appareil d'analyse de sons complexes. *Bell System Technical Journal.* Avril 1927.

Norton. — Analyse de sons complexes. *Bell telephone Laboratory-Reprint* B-370. Juin 1928.

Wegel et Moore. — Appareil d'analyse de sons complexes. *Bell System Technical Journal.* Avril 1924.

Caractéristiques et étalonnage de microphones

Barnes et West. — Etalonnage de microphones à l'aide du disque de Lord Rayleigh. *The Journal of the institution of Electrical Engineers,* vol. 63, p. 502. 1925.

Chavasse. — Rapport sur les bruits et leur mesure. *Bulletin de la Société Française des Electriciens.* Février 1932.

Campbell. — Microphone pour très basses fréquences. *Proceedings physical Society of London.* Février 1919.

Gerlach. — Méthode d'étalonnage de microphones. *Wissenschaftliche Veroffentlichungen aus dem Siemenskonzern,* vol. 3, p. 139. 1923.

Hartmann. — Description du microphone à ruban Siemens et Halske. *Electrische Nachrichten Technik,* S-289-297. 1931.

Meyer. — Microphone pour la mesure des intensités sonores. *Journal of the scientific Instruments,* vol. 4, p. 113. 1930.

Trendelenburg. — Microphone à condensateur. *Zeitschrift für Hochfrequenztechnick.* Juin 1926.

Sivian. — Etalonnage de microphones à l'aide du disque de Lord Rayleigh. *Philosophical Magazine,* vol. 5, p. 615. 1928.

Wente. — Théorie de fonctionnement du microphone à condensateur. *Physical Review,* vol. 10, p. 39. 1917.

Wente. — Efficacité relative du microphone à condensateur. *Physical Review,* vol. 19, p. 498. 1922.

Wente. — Microphone électrodynamique. *The Journal of the acoustical Society of America* vol. III. Juillet 1931.

LA MESURE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE EN HAUTE TENSION (1)

par M. P. de la Gorce,
Sous-Directeur adjoint du Laboratoire Central d'Electricité.

Je m'excuse de revenir sur un sujet qui a été traité récemment par M. Mieg avec tant de compétence. Mais la question est si importante que votre 6e section a jugé souhaitable qu'elle fasse l'objet d'un large débat ; et la présente note n'a pour but que d'amorcer la discussion.

Peu de mesures en effet ont de telles conséquences au point de vue économique et financier, puisqu'il s'agit d'enregistrer et par suite de facturer d'énormes quantités d'énergie. Pour nous limiter aux vérifications qui nous ont été confiées dans ces derniers mois, nous citerons un poste de comptage de la région du Nord où l'énergie journalière était de 10 000 kWh, un autre de la région parisienne où une erreur de 5 pour cent représentait par jour 1 500 kWh, un troisième, dans l'Est, où une erreur de 2 pour cent entraînait une perte de 9 000 f par mois. M. Mieg a signalé le cas très frappant où l'énergie passe en transit d'un réseau à un autre et où une erreur de 0,5 pour cent sur les compteurs à l'entrée et à la sortie peut réduire de 10 pour cent le bénéfice de la société transporteuse. Il est évident que les administrateurs de cette société exigeront dans les étalonnements une très haute précision.

Comment le problème se pose-t-il au point de vue technique ? Un poste de comptage comprend des compteurs et des transformateurs de mesure (transformateurs de potentiel et d'intensité) et, dans la plupart des installations, chacun de ces appareils a été réglé et étalonné individuellement. Le compteur peut être choisi parmi les types de précision que les constructeurs ont établis pour les postes importants. Le principe ne diffère pas sensiblement de celui des compteurs usuels, mais la construction particulièrement soignée donne des garanties précieuses de constance et de régularité. Nous estimons qu'un compteur peut être étalonné en laboratoire à 3 millièmes près dans

---

(1) Rapport présenté à la séance du 27 juin 1932 de la 6e Section et qui sera discuté à la Semaine de discussions de novembre 1932 de la Société française des Electriciens.

des conditions bien déterminées de charge, facteur de puissance, température, forme de courbe. Entre la pleine charge et le dixième (facteur de puissance égal à 1) un compteur, même bien réglé, est susceptible de présenter des variations de l'ordre de 1 pour cent ; exceptionnellement ces variations peuvent être réduites à 0,5 pour cent. Le déphasage influe dans la même proportion ; on rencontre des écarts d'à peu près 1 pour cent entre $\cos \varphi = 1$ et $\cos \varphi = 0,5$. L'action de la température dépend beaucoup du mode de construction. Dans un compteur moderne, d'une marque réputée, nous avons trouvé une avance de 1 millième par degré à $\cos \varphi = 1$ et un retard de 2 dix-millièmes par degré à $\cos \varphi = 0,5$. L'influence de la forme de courbe est encore plus complexe. Nous n'avons pas fait d'expériences systématiques à ce sujet. Nous citerons cependant le cas d'un compteur qui nous avait été présenté comme compteur étalon ; à $\cos \varphi = 1$, une variation dans la forme des courbes avait un effet négligeable ; mais à $\cos \varphi = 0,3$, elle pouvait amener dans les indications du compteur des écarts de 2 pour cent. Il est donc évident que la précision de 3 millièmes atteinte en Laboratoire ne se conservera pas quand l'instrument sera installé dans le poste et soumis à des facteurs de variations si importants et si mal déterminés.

Quant aux transformateurs de mesure, les méthodes d'opposition, telles que celles que nous utilisons, permettent de les vérifier avec une très grande exactitude aussi bien au point de vue du rapport qu'au point de vue du déphasage, le premier pouvant, dans les cas favorables, être déterminé au millième et le second à 2 ou 3 minutes près. Mais les données qu'on obtient ainsi sont-elles valables avec la même rigueur dans l'utilisation pratique ? Nous avons déjà signalé que le seul fait d'employer un transformateur de potentiel avec les deux pôles isolés, tandis qu'on l'avait étalonné avec un pôle à la terre, peut modifier de 2 millièmes son rapport de transformation. Des variations dans la forme des courbes de courant et de tension ont aussi une influence qu'il est d'ailleurs difficile d'évaluer quantitativement. Enfin, le circuit secondaire réalisé pour l'essai peut ne pas correspondre exactement aux conditions d'emploi. Il y a en particulier, pour les transformateurs d'intensité, un élément d'incertitude dans la longueur et la section des conducteurs reliant les divers appareils.

Pour toutes ces raisons, l'étalonnement sur place de l'ensemble du poste de comptage (transformateurs et compteurs) présente des avantages incontestables. Il faut toujours y recourir quand l'enjeu est important et que les difficultés de mise en œuvre ne sont pas insurmontables. Celles-ci tiennent surtout aux dimensions et aux poids des

transformateurs de potentiel étalons, excessivement lourds et encombrants à partir de 60 000 V. Afin d'y substituer des appareils plus maniables, en même temps que plus précis, rappelons que le Laboratoire Central d'Electricité a étudié et fait construire des résistances spéciales pour hautes tensions. L'étalonnement sur place est particulièrement délicat quand la charge du réseau est très variable (moteurs de traction ou de laminoirs par exemple). On peut cependant presque toujours obtenir des moyennes assez exactes, grâce à des lectures très rapprochées et très nombreuses.

Même dans le cas favorable d'une puissance sensiblement constante, et malgré tous les soins apportés aux mesures, il ne semble pas qu'on puisse garantir actuellement l'étalonnement d'un compteur à haute tension à moins de 5 millièmes près. Et encore subsiste-t-il divers éléments d'incertitude, tels que la température et la forme de courbes, dont nous avons souligné l'influence et qui peuvent varier d'un jour à l'autre. Cette précision paraîtra peut-être insuffisante à quelques exploitants. Mais il est préférable, croyons-nous, de ne pas entretenir d'illusions et d'éclairer les administrateurs sur le degré de précision avec lequel certains contrats, d'une grande importance financière, pourront être appliqués et vérifiés par les techniciens.

PROCÉDÉ DE MESURE DES COURANTS CONTINUS A FORTE INTENSITÉ (1)

par M. Ch. DIETSCH.

Chef de service au Laboratoire Central d'Electricité.

L'auteur après avoir indiqué les raisons qui nécessitent une amélioration des méthodes utilisées actuellement pour la mesure précise des courants continus à forte intensité, propose un nouveau procédé de mesure de ces grandeurs exempt des erreurs inhérentes aux premières méthodes.

L'exposé comporte 4 parties :

I. — *Généralités.*
II. — *Théorie de la méthode proposée.*
III. — *Réalisation de la méthode de mesure.*
IV. — *Résultats obtenus.*

I. — Généralités

La mesure des courants continus de forte intensité constitue un des problèmes de la technique des mesures qui ne semble pas encore avoir reçu de solution parfaite. Malgré le nombre de plus en plus important d'installations utilisant l'énergie électrique sous la forme de courant continu à forte intensité et le pourcentage élevé de l'énergie électrique totale consommée sous cette forme, la question de la mesure précise de ces courants ne semble intéresser que les techniciens chargés des essais de réception des machines utilisant ou produisant ces courants. La raison de cet état de chose se trouve dans le fait que l'énergie utilisée sous la forme de courant continu à forte intensité est presque dans la totalité des cas, achetée sous forme de courant alternatif à haute tension et par conséquent seule la mesure de l'énergie sous cette dernière forme intéresse le distributeur et le consommateur.

L'acceptation d'une machine n'étant maintenant dans la plupart des cas prononcée qu'à la suite d'essais de réception, ceux-ci deviennent de plus en plus nombreux. De plus, une grande partie des usagers exigent avec juste raison que les essais soient effectués avec la plus

(1) Ce rapport a été présenté à la séance du 30 mai 1932 de la 6e Section et sera discuté à la Semaine de discussions de novembre 1932 de la Société française des Electriciens.

grande précision possible et à cet effet réclament, pour les appareils utilisés au cours des essais, des procès-verbaux d'étalonnement émanant d'un Laboratoire officiel tel que le Laboratoire Central d'Electricité. Or, les progrès de la technique permettant d'exiger des garanties de plus en plus élevées, il est logique que ces progrès entraînent le perfectionnement correspondant des appareils de mesure ainsi que des méthodes de mesure utilisées pour la vérification de ces garanties.

Ce sont les raisons indiquées ci-dessus et qui sont mises en plus grande évidence par l'exemple cité ci-dessous, qui nous ont conduits à perfectionner les méthodes utilisées jusqu'à présent pour la mesure des courants continus à forte intensité.

Examinons, en effet, les conditions de réception d'un groupe convertisseur de 2 500 kW environ, composé d'un moteur asynchrone alimenté sous une tension d'environ 10 à 12 000 V et d'une génératrice fournissant du courant continu sous une tension de 250 V.

Le courant débité par la génératrice atteint par suite, à la pleine charge, la valeur de 10 000 A.

Le cahier des charges relatif à la fourniture de ce groupe impose la détermination du rendement aux différentes charges suivantes

$\frac{4}{4}$ charge, $\frac{3}{4}$ de charge, $\frac{1}{2}$ charge.

Il spécifie d'autre part que les rendements pour ces trois charges auront les valeurs suivantes :

89,2 pour cent 88,5 pour cent 85,5 pour cent.

Pour tenir compte de l'imperfection des mesures, des erreurs des appareils de mesure et des causes extérieures pouvant fausser les mesures, le cahier des charges admet une tolérance de 1 pour cent.

D'après la nature des mesures qui entrent en jeu dans la détermination du rendement, cette tolérance de 1 pour cent doit comprendre :

1° La différence entre les erreurs théoriques et les erreurs réelles :
des transformateurs de tension ;
des transformateurs de courant ;
des wattmètres ;
du millivoltmètre ;
du voltmètre ;
du shunt.

2° Les erreurs de lecture résultant de la lecture simultanée de 4 appareils.

3° Les erreurs dues à des causes extérieures telles que la température et les champs extérieurs.

La somme des erreurs du paragraphe 1, en y exceptant celles du shunt, peut facilement atteindre 0.5 pour cent et même 1 pour cent si l'on ne prend pas toutes les précautions au cours de l'étalonnement de ces appareils.

La somme des erreurs de lecture sur les quatre appareils, en admettant que ceux-ci soient utilisés dans les meilleures conditions possibles, c'est-à-dire dans la seconde moitié de leur échelle, ce qui n'est pas toujours possible, que la charge ne soit pas trop variable et enfin que les lectures soient effectuées par des personnes très expérimentées, doit être considérée comme étant au minimum égale à 0,5 pour cent.

En additionnant les erreurs indiquées ci-dessus, nous voyons que, même en nous plaçant dans les meilleures conditions possibles, le chiffre fixé dans le cahier des charges pour la tolérance ne permet aucune erreur due à des causes extérieures et que, de plus, le shunt ne doit pas comporter une erreur qui soit différente au cours de l'utilisation de celle déterminée au cours des étalonnements préliminaires.

Le cahier des charges spécifie, d'autre part, qu'en cas de dépassement des chiffres garantis, les pénalités suivantes seront infligées au constructeur :

0,15 pour cent de la fourniture par centième entier trouvé en moins des chiffres garantis ;

le refus total si les valeurs trouvées pour les rendements s'écartent de 4 pour cent + 1 pour cent, soit 5 pour cent, des chiffres indiqués.

Ces différents chiffres montrent que, même en ne tenant pas compte des erreurs dans la mesure des courants, erreurs qui comme nous le verrons plus loin peuvent dans certains cas atteindre des valeurs relativement importantes, la valeur admise par le cahier des charges pour la tolérance est trop faible.

Méthode normale de mesure des courants continus a forte intensité.

Examinons maintenant les erreurs qui s'introduisent dans la mesure d'un courant continu atteignant la valeur indiquée plus haut. La méthode habituellement utilisée pour la détermination d'un courant continu consiste à mesurer, à l'aide d'un millivoltmètre de sensibilité appropriée, la tension aux bornes d'un shunt inséré dans le circuit dans lequel passe le courant à mesurer. Il résulte de là que la mesure sera entachée des erreurs affectant l'un et l'autre des deux appareils men-

tionnés ci-dessus. Examinons quelles sont les erreurs et comment il est possible de les éliminer.

1° *Millivoltmètres.* — Ces appareils, qui peuvent être construits de façon parfaite et ne présenter qu'une erreur très faible lorsqu'on les utilise dans un laboratoire en l'absence de champs magnétiques importants, sont presque toujours influencés par les champs importants dus aux courants circulant dans les barres voisines. Même pour des appareils cuirassés construits spécialement pour ce genre de mesure, les erreurs peuvent atteindre facilement 1 pour cent dans le cas de courants de l'ordre de 5 000 A.

Pour éliminer ce genre d'erreur on peut, soit la déterminer en faisant varier pour la position utilisée et le courant mesuré l'orientation de l'appareil soit, ce qui n'est pas toujours possible, soustraire l'appareil à l'action de ces champs. Cependant on est limité dans ce dernier cas à la fois par les dimensions de la salle d'essai (cas des sous-marins) et par la longueur des cordons qui introduisent pour l'appareil un coefficient de température pouvant à son tour fausser les mesures.

2° *Shunts.* — Les erreurs les plus importantes et qui, dans la plupart des cas ne peuvent pas être déterminées de façon précise, proviennent de l'utilisation de ces appareils que leur simplicité apparente rend très commodes.

Le nombre important des causes d'erreurs donne déjà une idée des difficultés que l'on rencontre dans l'emploi des shunts lorsque l'on veut effectuer des mesures précises.

Ces erreurs proviennent :

1° de la variation de la résistance apparente (2) du shunt, pour un jeu de bornes donné, avec la répartition du courant dans le shunt.

2° de la variation de la résistance apparente du shunt avec la température.

3° de la présence de forces électromotrices parasites dues à des couples thermoélectriques.

L'étude de ces erreurs a déjà fait l'objet de nombreux et importants travaux, parmi lesquels nous citerons ceux relativement récents publiés dans les numéros de la Revue générale de l'Electricité du 18 janvier 1930 et du 21 mars 1931.

Ces différentes études, tout en ayant contribué à faire avancer dans

(2) Nous appellerons résistance apparente pour un jeu de bornes donné le quotient de la différence de potentiel entre ces bornes par le courant circulant dans le shunt déterminé par une méthode directe.

une large mesure la question de la mesure des courants continus à forte intensité, n'ont pas encore abouti à une solution parfaite permettant l'utilisation avec précision de shunts de gros calibres.

Afin de montrer l'importance que joue la répartition du courant dans un shunt et par là même l'importance de la façon dont il est construit et la façon dont il est branché, nous citerons ci-dessous quelques valeurs obtenues au cours de mesures effectuées sur des shunts de différents calibres.

a) *shunt de* 5 000 *A* = 0,1 *V*

Ce shunt avait ses deux bornes de prise de tension placées sur les faces des blocs parallèles aux lames du shunt.

1° en alimentant de façon symétrique, la résistance a été trouvée égale en microhms à 20,60

2° En alimentant le shunt par les lames situées du côté des bornes .... R = 20,66

3° En alimentant le shunt par les lames opposées aux bornes .... R = 20,52

Ces trois mesures ont été faites pour le même courant.

b) *shunt de* 15 000 *A* = 0,3 *V*

Ce shunt comportait 4 jeux de bornes situés sur les 4 faces des blocs d'amenée de courant.

Les bornes 1 et 3 étaient situées sur la face perpendiculaire aux lames, les bornes 2 et 4 étaient situées sur les faces parallèles aux lames.

Pour une alimentation symétrique, les résistances trouvées ont été les suivantes en microhms :

Bornes :	1	2	3	4
Résistances :	20	21,5	20,2	21,38

En alimentant le shunt par la moitié des lames situées du côté des bornes 1.

Bornes :	1	2	3	4
Résistances :	20,28	21,5	19,93	21,41

c) *Shunt de* 25 000 *A* = 0,1 *V*

Ce shunt comportait 4 jeux de bornes situés tous sur la même face perpendiculaire aux lames du shunt à des distances différentes de l'axe longitudinal du shunt.

Ces jeux étaient désignés par les chiffres : 1 — 1′, 2 — 2′, 3 — 3′, 4 — 4′.

Pour une alimentation symétrique du shunt, les résultats obtenus ont été les suivants en microhms :

Bornes :	1 — 1′	2 — 2′	3 — 3′	4 — 4′
Résistances :	3,83	3,9	3,9	3,832

En alimentant seulement la moitié des lames situées du côté des bornes 1 — 1′ les résultats obtenus ont été les suivants :

Bornes :	1 — 1′	2 — 2′	3 — 3′	4 — 4′
Résistances :	3,892	3,907	3,842	3,747

Ces résultats montrent que, pour un shunt donné et un même jeu de bornes, on peut obtenir des résistances dont les valeurs diffèrent de 2 pour cent et même davantage selon la façon dont le shunt est relié au reste du circuit.

L'étude approfondie des shunts de gros calibre montre que l'on peut, par une construction spéciale, diminuer leurs erreurs dans d'assez fortes proportions. La suppression totale de ces erreurs ne paraît cependant pas possible avec des shunts de dimensions normales.

Aussi avons-nous cherché dans une autre voie à remédier à cet état de chose et ce sont les résultats de ces recherches qui nous ont conduits à la méthode de mesure que nous exposons dans les lignes qui suivent :

II. — Théorie de la méthode proposée

Le principe de la méthode proposée a été décrit dans les comptes rendus de l'Académie des Sciences du 6 juillet 1931. Nous rappellerons que cette méthode est basée sur les variations des caractéristiques d'un transformateur de courant sous l'action d'un champ continu que l'on superpose au champ alternatif produit par les ampères-tours résultant du primaire et du secondaire.

Ces caractéristiques, qui sont l'angle de déphasage et le rapport de transformation, peuvent être exprimées facilement en fonction des constantes du transformateur et celles du circuit extérieur sur lequel est fermé le secondaire.

Considérons, en effet, le diagramme complet d'un transformateur d'intensité.

En désignant par :

r la résistance totale du circuit secondaire ;

l la somme de l'inductance de fuite et de l'inductance des appareils extérieurs ;

L l'inductance principale du secondaire;
α l'angle d'avance hystérétique;
I_0 le courant magnétisant;
$I\mu$ le courant à vide;
K le rapport théorique de transformation;
θ l'angle de déphasage entre le courant primaire et le courant secondaire décalé de 180° ;

η le rapport de transformation $\frac{I_2}{I_1}$.

On établit, à l'aide de calculs très simples les formules suivantes permettant de calculer le déphasage et le rapport de transformation :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{1 + \frac{L\omega}{Z} \frac{\cos \alpha}{\cos \gamma}}$$

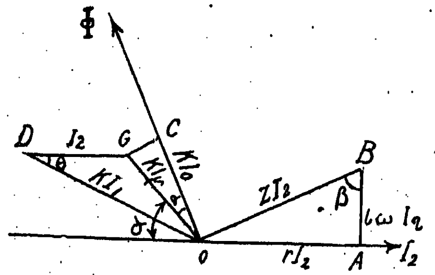


Fig. 1.

$$\eta = K\left[\cos \theta - \frac{\sin \theta}{\operatorname{tg} \gamma}\right] \# K\left[1 - \frac{\theta}{\operatorname{tg} \gamma}\right],$$

ce qui avec

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{tg} (\beta - \alpha) = \frac{r - l\omega \operatorname{tg} \alpha}{l\omega + r \operatorname{tg} \alpha},$$

donne

$$\operatorname{tg} \theta \# \theta = \frac{r - l\omega \operatorname{tg} \alpha}{(L + l)\omega + r \operatorname{tg} \alpha} \# \frac{r}{(L + l)\omega} - \frac{l}{L + l} \operatorname{tg} \alpha,$$

$$\eta = K\left[1 - \frac{l\omega + r \operatorname{tg} \alpha}{(L + l)\omega + r \operatorname{tg} \alpha}\right] \# K\left[1 - \frac{l}{L + l} - \frac{r \operatorname{tg} \alpha}{L + l}\right].$$

Ces formules nous montrent que le déphasage et le rapport de transformation sont fonction à la fois de l'inductance principale du secondaire et de l'angle d'avance hystérétique, grandeurs toutes deux fonctions de l'état magnétique du fer.

Les formules générales indiquées ci-dessus se simplifient lorsque le terme l, somme de la réactance de fuites et de la réactance externe,

est négligeable devant r, cas qui se présente pour un tore dont le secondaire régulièrement enroulé est fermé sur une résistance purement ohmique.

En effet, dans ce cas, le diagramme du transformateur est celui de la figure 1' de laquelle on déduit facilement

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{KI\mu \cos \alpha}{I_2 + KI\mu \sin \alpha}$$

et $I_\mu \sin \alpha$ étant en général négligeable devant I_2,

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{KI\mu \cos \alpha}{I_2}$$

ce qui peut s'écrire :

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\text{courant réactif à vide}}{\text{courant en charge}}.$$

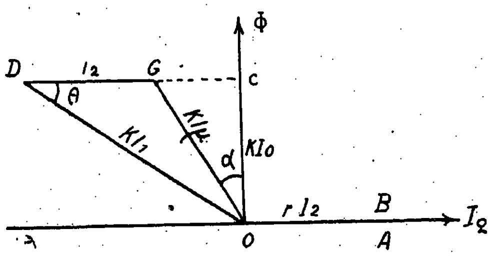


Fig. 1'.

De même, pour le rapport de transformation :

$$KI_1 \cos \theta = I_2 + KI\mu \sin \alpha$$

on peut sans erreur appréciable écrire $\cos \theta = 1$ de sorte que l'équation précédente peut s'écrire :

$$\frac{KI_1}{I_2} = 1 + \frac{KI\mu \sin \alpha}{I_2}$$

ce qui donne pour l'expression de l'erreur sur le rapport de transformation :

$$\varepsilon = \frac{KI_1 - I_2}{I_2} = \frac{KI\mu \sin \alpha}{I_2}$$

ce qui peut s'écrire :

$$\varepsilon = \frac{\text{courant act f à vide}}{\text{couiant en charge}}.$$

L'étude de la variation du déphasage et du rapport de transformation se ramène par suite à l'étude de la variation de ces deux grandeurs.

1° Variation de l'inductance principale.

L'inductance principale du secondaire a pour expression

$$L = \frac{4\pi n^2 S}{l} \mu,$$

n étant le nombre de spires du secondaire ;
l la longueur de la ligne de force moyenne :
S la section droite du fer;
μ étant la perméabilité alternative ou perméabilité dynamique (appelée en anglais « incremental permeability ») et définie comme étant égale au rapport de la variation de l'induction à la variation corrélative du champ

$$\mu_{alt} = \frac{\Delta B}{\Delta \mathcal{H}} .$$

Le fait de prendre à la place de cette dernière expression le rapport B définissant la perméabilité continue ou perméabilité statique donnerait lieu à des erreurs importantes.

L'expression de l'inductance principale du secondaire nous montre que celle-ci est proportionnelle à μ_{alt} dont il suffit par suite d'étudier les variations.

L'étude de la façon dont se comportent les différents matériaux magnétiques soumis à la fois à l'action d'un champ alternatif de faible amplitude et d'un champ continu a déjà fait l'objet de travaux très importants parmi lesquels nous citerons ceux effectués en vue de permettre le calcul précis, d'une part des transformateurs utilisés en téléphonie et, d'autre part, en vue de la construction des éléments des filtres utilisés dans la technique des courants redressés.

Les résultats de ces études ont confirmé ceux obtenus par nous sur un transformateur d'intensité construit avec des tôles ordinaires. Ces résultats peuvent être expliqués de la manière indiquée ci-dessous : Nous admettrons et l'expérience nous a montré que cette hypothèse était justifiée, que pour les cycles d'hystérésis de faible amplitude comme ceux intervenant dans les transformateurs d'intensité et qui pratiquement se confondent avec des ellipses très aplaties pour les qualités de tôles utilisées dans la construction de ces appareils, la perméabilité alternative a une valeur constante.

Cette valeur est prise égale à la pente de la droite joignant l'origine au sommet du cycle et par suite elle est aussi égale à la perméabilité statique correspondant au sommet du cycle d'hystérésis.

Le fait de superposer un champ continu au champ alternatif a pour effet de déplacer le long de la courbe d'aimantation l'origine des cycles d'hystérésis dus au champ alternatif.

L'expérience montre que les cycles d'hystérésis tracés dans ces conditions sont très inclinés sur la courbe d'aimantation continue.

Si l'on calcule dans ces conditions l'expression

$$\mu_{\text{alt}} = \frac{\Delta B}{\Delta \mathcal{H}},$$

en admettant la même hypothèse que celle indiquée ci-dessus, on trouve une valeur bien plus faible que celle obtenue pour des cycles de même amplitude, mais décrits autour de l'origine de la courbe de première aimantation et d'autant plus faible que le champ continu a une valeur plus élevée.

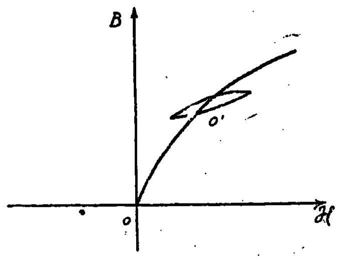


Fig. 2.

De plus, il n'y a plus aucun rapport, dans ce cas, entre la perméabilité alternative et la perméabilité statique correspondant, soit à l'origine des cycles, soit à leur extrémité.

L'étude de la variation de la perméabilité alternative en fonction d'un champ continu se superposant à un champ alternatif conduit au tracé d'une famille de courbes.

Ces courbes diffèrent les unes des autres par la valeur de l'amplitude du champ alternatif.

Elles ont été relevées de la manière suivante :

Le transformateur d'intensité étudié comportait plusieurs enroulements primaires correspondant à différentes sensibilités.

L'un des enroulements primaires était fermé, à travers une résistance suffisamment élevée, sur une source à courant continu de tension variable permettant ainsi de soumettre le fer à des champs continus de différentes valeurs. Les autres enroulements primaires étaient laissés ouverts.

L'enroulement secondaire était alimenté en courant alternatif et l'on

pouvait faire varier la tension aux bornes de façon à faire décrire au fer des cycles de différentes amplitudes.

En maintenant la tension aux bornes du secondaire et, par suite, l'induction constante, on mesurait pour chaque valeur du champ continu le courant absorbé par le secondaire.

La valeur élevée de la résistance insérée dans le primaire permettait de considérer ce courant comme étant celui absorbé à vide par le transformateur pour l'induction correspondante (3).

Dans le cas où on aurait voulu faire des mesures plus rigoureuses, il aurait suffi de constituer le circuit magnétique du transformateur par deux noyaux identiques sur lesquels les enroulements à courant alternatif seraient enroulés de manière à ne pas présenter d'induction mutuelle avec l'enroulement auxiliaire parcouru par du courant continu. Les différentes courbes ainsi obtenues permettent de calculer, pour une induction donnée et par suite pour un courant et une charge secondaire donnés, les variations de l'inductance principale en fonction d'un champ continu et de déterminer la valeur de l'induction donnant pour un champ continu déterminé, dans le cas qui nous intéresse pour un champ continu le plus faible possible, la plus grande variation du déphasage et par suite la plus grande sensibilité à la méthode. Nous verrons d'ailleurs plus loin qu'une autre condition impose la valeur optima de l'induction.

De plus, la comparaison de ces courbes avec celles données par différents auteurs pour des circuits magnétiques constitués avec des matériaux différents, en particulier avec des alliages à haute perméabilité tels que les alliages au nickel dont la teneur en nickel est, d'une part de 78 pour cent, d'autre part comprise entre 40 et 60 pour cent, montre que la sensibilité est fortement accrue par l'emploi de ces alliages surtout ceux de 78,5 pour cent, c'est-à-dire ceux désignés sous le nom de Permalloy type B et de mumétal.

2° *Variation de l'angle d'avance hystérétique.*

Les mesures faites en vue de permettre le calcul de la variation du déphasage et du rapport de transformation, nous ont montré que la loi de STEINMETZ, qui semble applicable en l'absence de courant continu pour des inductions comprises dans des limites pas trop étendues, ne l'est plus du tout lorsqu'on superpose un flux continu au flux alternatif normalement existant.

(3) Un essai préliminaire nous a montré que l'erreur commise en faisant cette hypothèse était pratiquement négligeable.

Le fait a déjà été constaté à diverses reprises et en particulier il a été signalé en 1896 dans un article publié dans les n^{os} 50 et 51 de l'E. T. Z. par MM. EISLER et REITHOFER.

En partant de la formule :

$$\sin \alpha = \frac{4\mu a \eta}{B_m^{0,4}}$$

obtenue en admettant la loi de STEINMETZ et en remplaçant μ_{alt} par la valeur déterminée ainsi qu'il a été dit au paragraphe précédent, on trouve une valeur beaucoup trop faible pour sin α, ce qui montre que la formule de STEINMETZ donne des valeurs trop faibles pour les pertes et, par suite, que le coefficient 1,6 est lui-même trop faible.

D'autre part, en partant de la loi admise par les constructeurs de machines pour le calcul des pertes par hystérésis, loi dans laquelle on admet que l'exposant de l'induction est lui-même fonction de l'induction et qui peut s'exprimer sous la forme :

$$W_B = 0{,}25\eta V f \left(\frac{B}{10\,000}\right)^{1,4+0,75\frac{B}{10\,000}}$$

nous n'avons pas obtenu de bien meilleurs résultats.

Il semble que seule la mesure directe à l'aide d'un wattmètre adapté spécialement à ce genre de mesures permette de déterminer d'une façon simple et précise la valeur de l'angle d'avance hystérétique lorsqu'il y a superposition d'un flux continu à un flux alternatif (4).

Des mesures effectuées en utilisant cette méthode nous ont montré que l'angle d'avance hystérétique diminuait lorsque le rapport $\frac{\text{champ continu}}{\text{champ alternatif}}$ augmentait.

Cette diminution en fonction du champ continu paraît augmenter avec l'intensité du champ alternatif.

Les valeurs indiquées ci-dessous permettent d'avoir un ordre de grandeur des variations du rapport de transformation et du déphasage en fonction de la valeur du champ continu.

Le premier tableau se rapporte à un transformateur d'intensité type tore de construction normale et dont le circuit magnétique est construit avec des tôles ordinaires pour transformateurs de mesure. Les chiffres qui y figurent sont les résultats de mesures effectuées en utilisant les méthodes indiquées plus haut et par suite ils ne doivent pas être considérés comme étant donnés avec une précision très rigou-

(4) La détermination des pertes peut également être faite de façon précise en utilisant la méthode décrite dans le *Bulletin de la Société Française des Electriciens* de décembre 1929.

reuse. Nous avons, en effet, négligé l'effet de déformation de la courbe dans le calcul de la valeur maximum du champ alternatif. Pareille manière d'opérer nous a paru être justifiée pour le but recherché. Dans le cas contraire, il aurait suffi d'employer le procédé appliqué par le Laboratoire Central d'Electricité pour ce genre de mesures et qui se trouve décrit dans le bulletin de la Société française des Electriciens de décembre 1929 dans un article intitulé « sur un procédé permettant la détermination des propriétés magnétiques des tôles aux faibles inductions en courant alternatif ».

D'après cet article, les erreurs pouvant être commises du fait de l'assimilation du courant réel à un courant sinusoïdal sont de l'ordre de 4 pour cent et, par suite, ne faussent pas beaucoup les résultats obte-

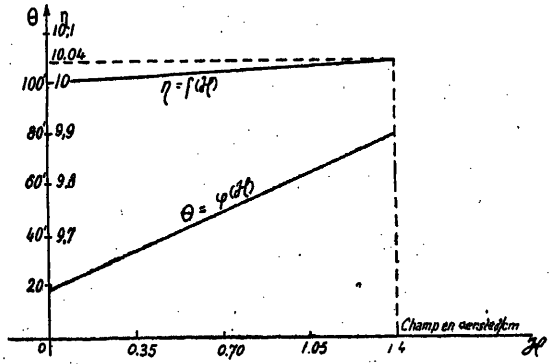


Fig. 3. — Déphasage et rapport de transformation du transformateur de rapport $\frac{50}{5}$ A (pour 15 VA et I_2 = 3,3 A) en fonction du champ continu

nus, surtout lorsque l'on recherche des variations de grandeurs et non ces grandeurs elles-mêmes.

Le deuxième tableau contient les résultats de calculs faits en partant de courbes de variation de la perméabilité alternative en fonction d'un champ continu indiquées dans un article sur les alliages à haute perméabilité présenté à la semaine d'octobre 1929 de la Société française des Electriciens et en supposant construit avec différents alliages un transformateur ayant les mêmes dimensions géométriques et le même nombre de spires; de plus, on a négligé son inductance de fuites secondaire et l'on a supposé que son secondaire était fermé sur une résistance ohmique.

Tableau n° 1

Le transformateur sur lequel ont porté les mesures possédait les caractéristiques suivantes :

TABLEAU N° 1

Valeur maximum de l'induction Gauss	Champ continu Oersted	Valeur efficace du courant à vide mmA	Sinus de l'angle d'avance hystérétique	Charge secondaire	Déphasage (*) à la pleine charge valeur-variation minutes	Rapport de transformation à la pleine charge valeur-variation
760	0	53,5	0,695	7,5 VA cos φ = 1	+ 27′	1,007 (7)
760	0,35	74	0,655	»	+ 38′ + 11″	1,009 (7) + 0,2 pour 100
760	0,75	97,5	0,61	»	+ 51′ + 24′	1,005 + 0,3 pour 100
1975	0	97	0,695	31,5 VA cos φ = 1	+ 48′	1,013
1975	0,35	125	0,54	»	+ 72′ + 24′	1,013 0,0 pour 100

TABLEAU N° 2

Nature des tôles	Induction alternative Gauss	Champ continu	Perméabilité alternative	Charge secondaire en VA	Déphasage à la pleine charge valeur-variation minutes
Acier au silicium.	760	0	1660	7,5 VA cos φ = 1	+ 32′
à 4 pour cent	760	0,35	1350	»	+ 39′ + 7′
Alliage fer-nickel.	760	0	7100	7,5 VA cos φ = 1	+ 7′
1re catégorie	760	0,35	2310	»	+ 23′ + 16′
Alliage fer-nickel.	760	0	3300	7,5 VA cos φ = 1	+ 16′
2e catégorie.	760	0,35	2390	»	+ 22′ + 6′

(*) Le signe + correspond à une avance du courant secondaire sur le courant primaire.

Rapport de transformation $\frac{50}{5}$ A.

Nombre de spires secondaires 200.

Section droite du fer 8,85 cm².

Longueur de la ligne de force moyenne 36 cm.

Les courbes (fig. 3) tracées ci-dessus donnent, en fonction du champ continu, les variations du déphasage et du rapport de transformation présentées par le transformateur ayant servi aux mesures et dont les caractéristiques sont indiquées plus haut (voir tableau 1).

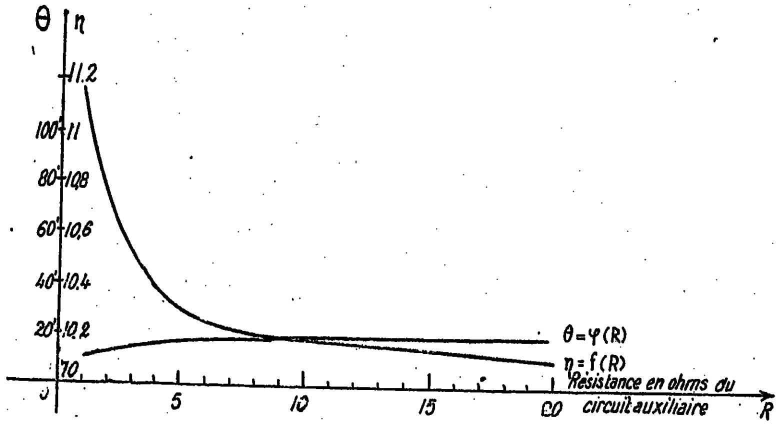


Fig. 4. — Déphasage et rapport de transformation d'un transformateur de rapport $\frac{50}{5}$ A en fonction de la résistance du circuit auxiliaire à courant continu (charge secondaire 15 VA, courant secondaire 3,3 A).

Ces courbes ont été relevées à l'aide de la méthode habituelle utilisée au Laboratoire Central d'Electricité pour l'étalonnage des transformateurs de courant.

III. — Réalisation de la méthode de mesure :

Les chiffres indiqués ci-dessus nous montrent qu'il suffit d'un champ continu très faible pour produire des variations relativement importantes du déphasage, mais que seules les valeurs importantes de ce champ modifient de façon sensible le rapport de transformation.

Ces conclusions, ainsi que d'autres considérations nous ont montré que par suite de la valeur importante de champs engendrés par les courants continus à mesurer, seules des méthodes d'opposition de flux peuvent conduire à des mesures précises. Aussi le transformateur utilisé pour ces mesures doit comporter, outre les enroulements primaires et secondaires normaux, un troisième enroulement bobiné sur le

même noyau magnétique et dans lequel on fait circuler dans le sens convenable un courant continu auxiliaire produisant un champ de sens opposé à celui produit par le courant à mesurer circulant dans le conducteur central sur lequel le tore est embroché.

Le principe de la méthode est donc le suivant :

« Opposer au champ continu produit par le courant à mesurer, un champ continu auxiliaire produit par un faible courant circulant dans un enroulement à grand nombre de spires, tel que le fer du transformateur soit revenu dans le même état que celui où il se trouvait en l'absence d'aucun champ continu, cette condition étant vérifiée par l'invariabilité des caractéristiques, déphasage et rapport de transformation du transformateur fonctionnant en transformateur d'intensité normal ».

L'application de ce principe sans autres précautions peut, du fait du phénomène d'hystérésis présenté par les tôles constituant le circuit magnétique du transformateur, conduire à des erreurs d'autant plus fortes que la valeur du champ coercitif correspondant au champ maximum créé par le courant continu à mesurer par rapport à la valeur de ce dernier champ est plus élevée.

Dans ce cas, l'égalité simple :

$$I_p = nI_A$$

devient :

$$I_p = nI_A - nI_{p0}$$

$n I_{p0}$ constituant les ampères tours coercitifs correspondant à I, si ce courant est celui qui est établi en premier lieu. On voit qu'en ne tenant pas compte de ce terme, on risque de commettre une erreur par excès qui, pour de faibles valeurs de I_p, peut être relativement importante.

Pour éviter une correction qui serait variable suivant le courant à mesurer, nous avons utilisé en premier lieu l'artifice indiqué dans la note présentée à l'Académie des Sciences et qui consistait à désaimanter, avant chaque mesure, le fer du transformateur en utilisant l'un des enroulements normaux du transformateur et en y faisant circuler un courant d'amplitude progressivement décroissante jusqu'à zéro, l'autre enroulement étant laissé ouvert de manière à faire parcourir au fer des cycles d'hystérésis d'amplitude décroissante.

Cette manière d'opérer compliquant les mesures, nous avons cherché un moyen permettant de provoquer la désaimantation sans aucune intervention extérieure.

A cet effet, nous avons remarqué qu'en augmentant suffisamment la charge secondaire on obtenait l'effet désiré.

L'augmentation de charge secondaire ayant pour effet d'augmenter l'induction à laquelle le fer travaille et, par suite, les ampères-tours magnétisants, ceux-ci deviennent à partir d'une certaine limite suffisants pour désaimanter le fer d'une façon complète. Cette limite se trouve être un peu supérieure à la valeur du champ magnétisant correspondant au maximum de la perméabilité alternative.

En rapprochant ces résultats de ceux obtenus par Searle (5) et par Burrows au Bureau of Standards (6) nous voyons que les travaux faits par ces auteurs confirmant les conclusions précédentes Burrows et Searle ont trouvé que le champ maximum auquel devait être soumis le fer pour que la désaimantation parfaite, qui d'après Burrows est caractérisée par le fait qu'aucun autre mode de désaimantation n'est susceptible de donner une perméabilité apparente plus élevée, condition que nous pouvons traduire par déphasage plus faible, ait lieu, il suffit de soumettre le fer à un champ magnétisant dont la valeur soit légèrement supérieure à celle du champ qu'ils ont désigné sous le nom de champ critique et qui correspond précisément au maximum de la perméabilité apparente. Cette valeur critique est également celle pour laquelle disparaît ce que ces auteurs ont appelé la polarisation.

Quant à la limite inférieure du champ magnétisant à appliquer dans cette opération il suffit, d'après Burrows, qu'il soit plus faible que le plus petit des champs pour lequel on veut déterminer la perméabilité, c'est-à-dire, dans le cas qui nous occupe, plus petit que le champ pour lequel on détermine le déphasage initial.

Il est inutile d'annuler complètement le champ, contrairement à ce que croyait Searle (7).

Dans nos mesures nous avons même constaté qu'il suffit que le champ magnétisant alternatif correspondant au courant secondaire et à la charge secondaire utilisée et pour lesquels on faisait la détermination du déphasage, ait une valeur supérieure au champ critique, pour qu'automatiquement, le fer puisse être considéré comme désaimanté. Dans le cas contraire, il serait d'ailleurs facile d'opérer la désaimantation complète en diminuant le courant primaire.

---

(5) *Searle Journal of the Institution of Electrical Engineers*, EXXXIV, page 539.
(6) *Bulletin du Bureau of Standards* 1908, page 205.
(7) Ce fait a une importance également pour les transformateurs de courant ayant eu leur circuit secondaire ouvert.

Le tableau (8) ci-dessous donne les résultats obtenus par BURROWS sur les tôles de transformateurs soumis au préalable à plusieurs reprises à un champ magnétisant de 100 gauss.

Champ magnétisant	Induction après désaimantation	Induction apparente	Polarisation directe	Polarisation cyclique
H	B	B_1	$B - B_1$	
0,1	68	26	42	
0,3	370	130	240	290
0,5	1 290	480	810	910
0,7	2 570	1 380	1 190	1 310
0,8	3 370	2 510	860	
0,9	4 300	3 700	600	730
1	5 130	4 750	380	5 0
1,2	6 730	6 490	240	
1,3	6 880	6 750	130	
1,4	6 950	6 860	90	110
2	8 880	8 880	0	0

Les chiffres obtenus lorsque le champ de 100 gauss était appliqué toujours dans le même sens, sont contenus dans la troisième et quatrième colonne.

Ceux obtenus lorsque le champ de 100 gauss était appliqué successivement dans un sens et dans l'autre sont contenus dans la cinquième colonne.

Ce tableau montre que c'est pour H = 1,3 gauss environ que ces tôles présentent leur maximum de perméabilité.

On voit également que c'est au-dessous de cette valeur, en particulier pour une valeur voisine de 0,3 gauss, que la polarisation relative $B - B_1$ présente son maximum et qu'elle disparaît complètement au-dessus de 1,4 gauss. Nous voyons que si les appareils servant aux mesures avaient une sensibilité illimitée, on aurait intérêt à faire la détermination du déphasage pour une valeur du courant secondaire donnant au champ magnétisant la valeur correspondant au maximum de la polarisation relative. En réalité, les choses ne se passent pas ainsi et le maximum de sensibilité a été obtenu dans l'utilisation de la deu-

(8) Ce tableau est extrait du livre de M. JOUAUST sur le ferromagnétisme. L'induction B introduite dans ce tableau est définie par le quotient $\frac{\Delta\Phi}{2S}$, S étant la section de l'éprouvette et $\Delta\Phi$ la limite vers laquelle tend la variation de flux observée en passant de + H à — H lorsque l'éprouvette a été soumise à un certain nombre de cycles entre ces limites. C'est celle que nous avons utilisée dans nos calculs pour la détermination de la perméabilité dynamique.

xième méthode décrite plus loin, pour un courant secondaire égal à la pleine charge et une charge secondaire correspondant à celle pour laquelle, avec cette valeur du courant, on dépasse légèrement le champ critique.

Le tableau suivant donne, en unités arbitraires, des résultats obtenus par SEARLE en faisant varier la valeur du champ appliqué au préalable.

Ce tableau comporte également les aires des boucles d'hystérésis que décrit l'acier.

Champ magnétisant primitivement appliqué. . .	0	2,5	5	10
Intensité apparente pour un champ de 1,5 gauss.	86,4	77,1	55	40,9
Aire de la boucle d'hytérésis.	180	150,8	94,5	66,2

Ces derniers résultats sont conformes à ceux obtenus par MM. EISLER et REITHOFFER en 1896 et aux conclusions que nous avons indiquées dans le paragraphe relatif aux variations de l'angle d'avance hystérétique.

Afin de pouvoir affirmer de façon absolument certaine que la désaimantation se trouve réalisée parfaitement et que par suite le zéro, soit du galvanomètre de résonance soit du wattmètre servant aux mesures, correspond bien à l'origine des deux axes de coordonnées des champs et des inductions, permettant ainsi d'écrire de façon rigoureuse :

$$I_1 = nI_2$$

nous avons effectué des vérifications supplémentaires à l'aide d'un fluxmètre du type GRASSOT.

Ces nouvelles mesures ont confirmé tous les résultats indiqués ci-dessus.

Une autre cause d'erreur se présente lorsqu'on utilise pour ces mesures un transformateur d'intensité ordinaire à plusieurs enroulements. La nécessité de faire circuler des courants continus variables dans les enroulements oblige à fermer ceux-ci sur des résistances variables. Or, les caractéristiques déphasage et rapport de transformation sont, ainsi que le montrent les courbes de la figure 4, fonction de la valeur de ces résistances. A partir d'une certaine valeur de ces résistances le déphasage varie relativement peu et le sens de sa variation est le même que celui dû au courant continu. Il résulte de là qu'une variation de la résistance ne peut que faire varier le minimum de la déviation sans changer la valeur du courant continu auxiliaire donnant ce minimum.

Le rapport de transformation varie par contre dans le sens opposé

avec la valeur de la résistance et avec la valeur du courant continu. Aussi convient-il, lorsqu'on utilise la méthode directe avec un transformateur d'intensité ordinaire, de tenir compte de ce fait. Dans l'utilisation de la deuxième méthode, cette variation n'intervient pas.

Ces causes d'erreurs peuvent être supprimées par l'utilisation d'un transformateur construit de façon à ce que les circuits traversés par du courant continu ne présentent pas d'induction mutuelle avec les circuits parcourus par du courant alternatif.

En ce qui concerne l'influence des conducteurs voisins parcourus par des courants continus intenses, nous avons constaté qu'elle était négligeable.

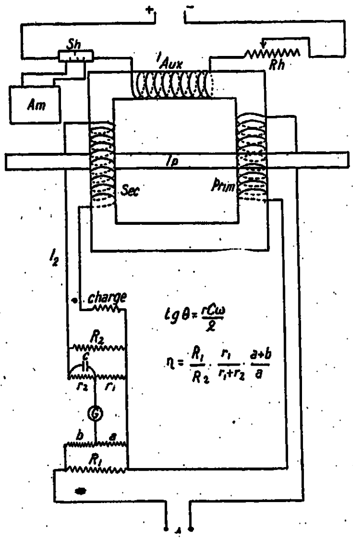


Fig. 5. — Mesure d'un courant continu par la détermination directe du déphasage et du rapport de transformation d'un transformateur de courant.

Solution pratique

Différentes solutions se présentent en vue de l'application du principe de la méthode énoncé plus haut.

La première, celle qui paraît évidente, consiste à mesurer directement, en particulier à l'aide de la méthode utilisée au Laboratoire Central d'Electricité pour l'étalonnage des transformateurs de mesure, le déphasage et le rapport de transformation et de faire varier le courant auxiliaire jusqu'à ce que ces deux grandeurs soient redevenues ce qu'elles étaient avant le passage des courants continus, ce qui se vérifie par le retour à zéro du galvanomètre de résonance utilisé comme appareil de zéro dans la méthode mentionnée ci-dessus.

Sous cette forme, la méthode proposée constitue plus particulièrement une méthode de Laboratoire ne pouvant pas être utilisée sans difficultés pour des mesures devant être effectuées dans des installations extérieures.

La deuxième solution indiquée ci-dessous ne présente plus cet inconvénient. Elle utilise seulement les variations du déphasage. Ces variations sont mesurées à l'aide d'un wattmètre spécial donnant toute sa déviation pour un facteur de puissance très bas. Ce wattmètre est monté de la manière suivante (fig. 6).

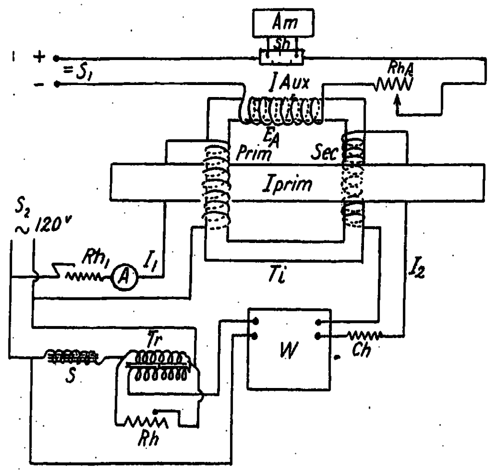


Fig. 6.

Ti	transformateur d'intensité	Rh	résistance réglable
Prim	primaire	S	self à fer
Sc	secondaire	Ch	charge secondaire
Ee	Enroulement auxiliaire	Rh_1 Rh_2	rhéostats
Sh	Shunt étalon	I_1	courant secondaire
Am	millivoltmètre étalon	I_2	courant primaire
W	wattmètre	I_{prim}	courant continu à mesurer
T_2	transformateur de décalage	I_{aux}	courant continu auxiliaire

Le circuit gros fil est alimenté par l'enroulement secondaire, le circuit fil fin par une tension en quadrature avec le courant secondaire et de même fréquence que celui-ci.

La quadrature exacte est obtenue à l'aide d'un dispositif de réglage très progressif constitué, par exemple, par un transformateur et une résistance montée selon le montage indiqué sur la figure 6. On peut également réaliser la quadrature, de manière commode en connectant en série avec le cadre de l'appareil des condensateurs et en branchant en série avec le primaire du transformateur une bobine de self induction variable. Cette quadrature qui se vérifie par le passage par zéro du wattmètre, est effectuée, en l'absence de champs continus,

pour un courant primaire et une charge secondaire donnée. Aussitôt que l'on fait passer du courant continu dans l'un des enroulements, le wattmètre dévie et sa déviation est proportionnelle à la variation de déphasage pour des valeurs pas trop importantes de celle-ci.

Pour annuler cette déviation et, par suite, ramener le déphasage à sa valeur primitive, il suffit d'opposer au champ continu créé un autre champ continu égal au précédent mais de sens opposé. La connaissance de ce deuxième champ permet la détermination immédiate du courant ayant produit le 1er champ.

Le wattmètre utilisé était d'un calibre de 5 A et 120 V et avait une constante évaluée en watts par division égale à 0,5 W. Ce wattmètre, ayant ses enroulements parcourus par les intensités nominales de

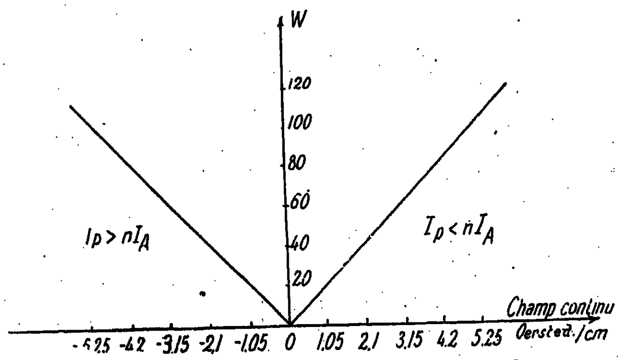


Fig. 7. — Déviations du wattmètre en fonction du champ continu
charge secondaire : 39VA cos = 0,98 courant secondaire 5 ampères.
Tension fil fin 120 volts.

pleine charge, donnait par suite une déviation égale à 1 division pour un déphasage égal à 2,8 mn.

Les valeurs indiquées plus haut pour les variations du déphasage en fonction de la grandeur du champ continu permettent de se rendre compte de la sensibilité que cette méthode permet d'obtenir. La courbe donnant la déviation du wattmètre en fonction du champ continu est, ainsi que le montre la figure 7, composée de deux droites symétriques par rapport à l'axe des ordonnées.

Ces droites peuvent être tracées une fois pour toutes pour un courant secondaire et une tension appliquée à l'enroulement fil fin donnés. Elles permettent d'ailleurs, sans difficultés, d'opérer la graduation du wattmètre utilisé en ampères-tours ou même directement en ampères continus.

Elles montrent également que dans la mesure d'un courant continu, il n'est pas indispensable de ramener à zéro le champ continu,

mais qu'il suffit de connaître la déviation du wattmètre et le sens du champ continu au moment de la lecture du courant auxiliaire d'opposition et de faire la correction. La précision des mesures n'est nullement affectée du fait de cette façon d'opérer, ainsi que nous l'ont montré de nombreuses mesures.

IV. — Résultats obtenus

Nous avons utilisé la méthode du wattmètre pour l'étalonnement de différents shunts pour des intensités comprises entre 1 000 et 6 000 A, cette dernière valeur correspondant au courant maximum pouvant être fournie par l'installation utilisée.

Le transformateur qui nous a servi était d'un type normal à plusieurs sensibilités obtenues au moyen de différents enroulements n'ayant pas de points communs. Utilisé comme transformateur d'intensité normal, il permettait d'obtenir les rapports :

$$\frac{1\,000\text{ A} - 500\text{ A} - 250\text{ A} - 200\text{ A} - 100\text{ A} - 50\text{ A} - 20\text{ A} - 10\text{ A}}{5\text{ A ou } 10\text{ A}}$$

Pour les mesures, les enroulements étaient utilisés de la manière suivante :

La sensibilité 1 000 A correspondant à un seul conducteur servait pour le courant continu à mesurer.

La sensibilité 10 A comportant 100 spires servait pour le courant continu d'opposition.

La sensibilité 50 A comportant 20 spires servait de primaire dans le fonctionnement en transformateur d'intensité.

Le secondaire couplé en 5 A comportant 200 spires était fermé sur le wattmètre et des résistances servant à compléter la charge secondaire.

Des mesures comparatives effectuées sur différents shunts à l'aide de la méthode du wattmètre utilisée de la manière indiquée ci-dessus et à l'aide de la méthode du pont double dont on a essayé de réduire au minimum les erreurs par un montage judicieux de shunt étalon de comparaison, nous ont montré que la méthode proposée ne comportait pratiquement pas d'erreurs. Les écarts observés entre les résultats fournis par les deux méthodes aussi bien à 1 000 A qu'à 6 000 A différant entre eux de moins de 2/1000 et même de moins 1/1000 lorsqu'on prenait des précautions relatives à la position du conducteur central et des conducteurs voisins. La durée d'une mesure au moyen de la méthode du wattmètre n'a guère été plus grande que pour la

mesure faite au moyen du pont double, malgré l'utilisation d'appareils qui n'étaient pas spécialement prévus pour ces essais. En particulier, l'enroulement auxiliaire du transformateur a dû être surchargé de 600 pour cent pour les mesures à 6 000 A, ce qui obligeait à une rapidité assez grande dans les mesures.

D'autre part, les enroulements présentaient entre eux de l'induction mutuelle obligeant à des précautions spéciales.

Ces deux conditions défavorables peuvent facilement être évitées par la construction d'un transformateur approprié à ce genre d'essais.

Nous pensons que, étant donné les résultats obtenus indiqués ci-dessus, la méthode proposée, qui n'utilise que des appareils transportables peu ou presque pas influençables, par les vibrations, peut présenter de grands avantages pour la vérification sur place dans les conditions mêmes de leur utilisation et sans apporter de perturbations, des shunts de gros calibres que l'on est obligé d'utiliser dans bien des cas.

La vérification effectuée dans ces conditions permettra de connaître avec une approximation très grande l'erreur du shunt dans les conditions où il fonctionne en service normal, erreur qui, pratiquement, est la seule qui ait besoin d'être connue.

La méthode que nous avons indiquée pour la mesure des courants continus à forte intensité peut être appliquée à la mesure de courants continus de n'importe quelle valeur et en particulier à des courants continus très faibles. Il suffit d'y apporter de très légères modifications.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

Production

22e annual report of the hydroelectric power commission of the Province of Ontario for the year ended october 31 st 1929. 1 volume 25 × 17 cm., de 458 pages, avec figures 1 carte hors texte. Imprimé par ordre de l'assemblée législative d'Ontario Herbert H. Ball, Toronto, 1930. (Don de l'ambassade du Canada).

Ce rapport qui contient un grand nombre de tableaux statistiques, renseigne très complètement sur les travaux de la commission qui contrôle 32 installations hydroélectriques.

Dix chapitres traitant successivement des actes législatifs intervenus en 1829 de l'exploitation de 20 réseaux particuliers ou municipaux des travaux d'aménagement hydrauliques et électriques accomplis, des laboratoires, de l'électrification des résultats financiers des diverses compagnies.

Un index de 26 pages permet de repérer facilement les noms des diverses Sociétés et installations dont il est question dans le volume.

Report on railway belt hydrographic survey for 1911-12. P.A. Carson, D.L.S. Ingénieur en chef 1re publication sur les ressources hydrauliques émanant du Ministère de l'Intérieur du Canada service des forces hydrauliques. 1 volume 25 × 16 cm., 539 pages, 29 figures, 8 cartes, édité par ordre du Parlement chez J. de la Taché, Ottawa. (Don de l'ambassade du Canada).

Après avoir rappelé qu'on désigne sous le nom de Railway Belt de la Colombie britannique, un territoire de plus de 800 km de long et 65 km de large, l'ouvrage donne des renseignements sur la législation de la jurisprudence relative aux chutes sur les évaluations à la puissance hydraulique disponible du bassin, sur les cours d'eau et la mesure de leur débit, sur les chutes de pluie, les irrigations, la puissance des chutes aménagées ou non, enfin une liste des lacs et rivières existant dans le district.

Recherches

Annales de Physique. Extrait Xe série, tome XVI (novembre 1931). Recherches expérimentales sur la propagation d'ondes aériennes dans un long tuyau cylindrique, par Th. Vautier, Professeur à la Faculté des Sciences de Lyon. 1 volume relié de 14 × 22 cm, de 100 pages, 15 figures. Edité par la librairie Masson et Cie, 120 boulevard Saint-Germain, Paris. (Don de l'auteur).

Ce volume comprend la 3e partie de l'étude. Pour les 2 parties précédentes, voir Annales de Physique, 10e série, tome XIV, 1930.

Formes d'ondes explosives enregistrées par une méthode interférentielle dans une conduite ouverte à une extrémité et fermée à l'autre.

The Concept of Beauty as Related Engineering (L'idée esthétique dans les travaux de l'ingénieur), par Dr ARTHUR-E. KENNELLY. 1 brochure n° 1034 de 19 × 27 cm., de 19 pages, 4 figures. Editée par l'Institut des Ingénieurs-Electriciens du Japon, à Tokio. Conférence faite au Japon en novembre 1931.

L'auteur cherche à établir si les travaux des ingénieurs doivent être considérés comme présentant une certaine beauté.

MÉCANIQUES

Publications scientifiques et techniques du Ministère de l'Air. Service des recherches de l'Aéronautique. Recherches expérimentales sur les ailes monoplanes. Par Elie CARAFOLI. Professeur à l'Ecole Polytechnique de Bucarest. 1 brochure 19 × 27 cm, 108 pages. 38 fig en vente chez Blondel la Rougery, 7 rue Saint-Lazare, et Gauthier-Villars, 55 quai des Grands-Augustins, Paris (1932). Don du Service.

Recherches exécutées à l'Institut aérotechnique de Saint Cyr. Rappel succinct de la théorie de l'aile monoplane. Distribution des pressions et mesure des forces aérodynamiques sur des ailes placées dans un courant plan.

MATHÉMATIQUES

Calcul graphomécanique. Appareils pour le calcul mécanique de l'intégrale du produit de 2 fonctions, par André NESSI et Léon NISOLLE, ingénieurs des Arts et Manufactures. Préface de M. Maurice d'Ocagne, membre de l'Institut. Une brochure de 18 × 27 cm, de 17 pages, 9 figures. Editée par la librairie Dunod, 92 rue Bonaparte, Paris (1932). (Don de l'éditeur).

Description de l'appareil à équerre, de l'appareil à cadres et à rails, application à l'intégration d'équations différentielles, résolution d'équations intégrales linéaires. L'appareil, inventé pour résoudre des problèmes, qui se présentent dans le chauffage industriel, peut être appliqué, à la déterminattion des moments d'une aire limitée à un contour fermé par rapport a un axe de son plan à la résolution d'équations intégrales des types de Voltera ou de Fredholmeh.

CONGRÈS. — EXPOSITION. — ACTES OFFICIELS. ANNUAIRES. — COMMÉMORATIONS.

Les organismes de l'acétylène et de la soudure autogène. Une brochure n° 1033, de 16 × 24 cm. de 48 pages. Editée par l'Office Central et Institut d'Acétylène et de Soudure Autogène, 32 boulevard de la Chapelle, Paris. (Don de l'Editeur).

Description de l'immeuble destiné à l'Office Central, liste des membres du Conseil d'Administration de l'Institut de Soudure autogène et de l'Ecole Supérieure de Soudure autogène. Fonctionnement de ces établissements.

Les améliorations rurales (Tome II). 1 brochure n° 1039 de 16 × 24 cm., de 246 pages. Editée par la Fédération Nationale des Collectivités d'Electrification et d'Améliorations rurales, 5 avenue de l'Opéra, Paris. (Don des éditeurs).

Compte rendu du Congrès des améliorations rurales, tenu à Paris (30 novembre-2 décembre 1931). Electrification, adductions, et évacuations d'eau, remembrement assainissement des terres, drainage, irrigation mécanique agricole.

La Chambre technique de Grèce. 1 brochure n° 1049 de 18 × 24 cm., de 31 pages. Editée 50 rue de l'Académie, à Athènes. (Don de la Chambre technique).

Cette brochure donne un résumé de l'historique de la fondation de la Chambre technique de Grèce, ainsi que des détails sur l'Administration, les différentes sections et les autorités élues et commissions pour la période de 1931 à 1933.

Conservatoire National des Arts et Métiers - **Laboratoires d'essais mécaniques, physiques, chimiques et de machines** Rapport sur le fonctionnement pendant l'année budgétaire 1930-1931, par M. DALBOUZE. Une brochure n° 1038 de 16 × 25 cm, de 27 pages. Editée par le Ministère de l'Instruction Publique et des Beaux-Arts (Don du Ministère).

Cette brochure est consacrée à l'étude des différents services et de leur fonctionnement pendant l'annee précitée : essais de physique, essais de métaux, essais de matériaux de construction, essais de machines, essais de chimie.

Technologie de la Soudure autogène : l'Aciérie par M. Maurice LEBRUN Ingénieur A. et M. 1 brochure n° 1026 de 14 × 22 cm, de 60 pages 68, figures. Prix 7,50. Editée par l'Office Central de l'Acétylène et de la soudure autogène, 104, boulevard de Clichy, Paris 1926 (Don de l'éditeur).

Cette brochure traite les questions suivantes :

Généralités sur la soudure acétylénique et la soudure électrique.

Applications de la soudure autogène aux mines de fer, à l'aciérie, aux hauts-fourneaux.

Technologie de la soudure autogène. Applications de la soudure autogène. Chaudières et réservoirs à pression. Règlements et règles de l'art, par M. Maurice LEBRUN, ingénieur A et M. Une brochure n° 1025 de 14 × 22 cm, de 133 pages, 92 figures. Prix 15 fr. Editée par La Soudure autogène française, 29, rue Claude-Vellefaux à Paris (11e).

Cette brochure traite les questions suivantes :

Notions de soudure autogène, apprentissage, règles de l'art (soudure oxy-acétylénique et soudure électrique à l'arc). Règlements du Bureau Véritas, de l'Association de Propriétaires d'appareils à vapeur et de la Chambre Syndicale de la Soudure autogène.

Chambre de Commerce de Paris. Ecole d'application du centre de préparation aux affaires (1932-1933). 1 brochure n° 1051 de 14×21 cm., de 43 pages. Editée par la Chambre de Commerce de Paris, 18, rue Chateaubriand, à Paris, 8e (Don de la Chambre de Commerce).

Cette brochure expose l'objet, le règlement et le programme de cette école.

Fondation Francqui. 1 brochure de 16 × 25 cm, de 19 pages Don de la fondation Francqui. Editée par la Fondation, 11 rue d'Edgmont, à Bruxelles. (1932).

Statuts et règlements organiques de cette fondation qui a pour objet de favoriser le développement du haut enseignement et de la recherche scientifique en Belgique en complétant l'action de la Fondation Universitaire et du Fonds national de la recherche scientifique.

Divagations économico-financières, par A. DELLA RICCIA. Une brochure n° 1030 de 20 × 27 cm, de 25 pages. Editée par l'auteur (15 janvier 1932). Imprimerie Veuve Monnom, 32 rue de l'Industrie, à Bruxelles (Don de l'auteur.

Dans cette brochure, l'auteur expose ses théories personnelles relatives à des questions d'économie politique : balances commerciales, circulations monétaires, balances des Comptes et des paiements, etc,.

IL Y A TRENTE ANS

Réunion ordinaire mensuelle du 5 novembre 1902.

Présidence de M. E. Harlé

Des 7 membres élus dans cette séance, nous comptons encore parmi nous M. H. Brunel et M. Ch. Maréchal.

M. P. Janet expose une *application de la méthode de la boucle à la recherche d'un défaut dans un câble triphasé souterrain.*

M. P. Janet montre comment M. Iliovici, du Laboratoire Central d'Electricité, a modifié la méthode classique de la boucle dans le cas de deux conducteurs intacts sur trois.

M. Armagnat fait une communication *sur les mesures magnétiques industrielles.*

Cette communication est un magistral exposé des méthodes et des appareils industriels pour les mesures magnétiques. Après avoir rappelé quelques principes généraux et les définitions des grandeurs magnétiques, il montre l'importance des joints imparfaits formant entrefer dans les hystérésimètres et indique toutes les précautions à prendre dans les essais.

Il expose la méthode balistique, puis décrit et critique les autres méthodes et appareils connus : appareil d'Hopkinson, méthode d'Ewing, perméamètre de Drysdale, pont magnétique d'Ewing, perméamètre Treat et Esterline, perméamètre Lamb et Walker, balance d'Ewing, balance magnétique de Du Bois, traceur de courbes magnétiques, perméamètres de Bruger, de Koepsel, perméamètres Carpentier, de Baily, Picou, hystérésimètre d'Ewing, de Blondel.

M. de Marchena fait une communication sur l' « *Influence des régulateurs sur le fonctionnement en parallèle des alternateurs et description d'un nouveau système de commande de ces régulateurs* ».

Le conférencier rappelle les lois régissant le fonctionnement des

régulateurs de vitesse (à poids et à ressorts), expose un calcul des oscillations propres des régulateurs, puis étudie les oscillations du système constitué par le régulateur et le moteur.

Ces considérations l'ont amené à concevoir une solution très simple, consistant à actionner le régulateur, non pas directement par la machine à régler, mais par un petit moteur d'induction branché sur les barres omnibus du tableau, c'est-à-dire alimenté par le réseau. Dans ces conditions, la vitesse du régulateur est entièrement soustraite aux variations périodiques de vitesse des alternateurs, et cet appareil n'entrera en action qu'à la suite d'une variation de la charge. Tous les régulateurs entrent alors simultanément en action et tout se passe comme s'il n'y avait qu'un régulateur unique pour toutes les machines accouplées sur le réseau.

BAR-LE-DUC. — IMP. COMTE-JACQUET. Le *gérant* : Alfred MAGNIER.

5e série, tome II, n° 24. Décembre 1932

BULLETIN

DE LA

SOCIÉTÉ FRANÇAISE

DES

ÉLECTRICIENS

SOMMAIRE

(1) La Société n'est pas solidaire des opinions émises par ses Membres dans les discussions, ni responsable des Notes ou Mémoires publiés dans le *Bulletin*.

LA TRANSMISSION D'ÉNERGIE A TRÈS HAUTE TENSION ET LES LIGNES SUR PYLONES ARTICULÉS [1]

par M. G. Darrieus.

Introduction (1° Nature physique de la transmission d'énergie : transport ou transmission ? 2° La force motrice : son rôle dans l'économie industrielle. 3° Influence de l'évolution moderne des centrales thermiques sur le transport de l'énergie et l'interconnexion) — Choix du mode et de la tension de transmission. (1° Avantage des très hautes tensions. 2° Position actuelle des problèmes de la stabilité et de la sécurité). — Construction des lignes à très haute tension. (1° Conducteurs. 2° Supports 3° Description de la ligne à 90.000 V sur pylônes articulés de Oued-Keberit à Aïn-Chénia. 4° Comparaison entre les lignes sur pylônes articulés et les lignes ordinaires. 5° Implantation des supports. 6° Rupture des conducteurs). — Conclusion.

Introduction.

1°. — *Nature physique de la transmission d'énergie : transport ou transmission ?*

Mentionnons tout d'abord que la préférence généralement donnée au choix de l'expression transmission sur celle de transport d'énergie, considérée comme impropre et relâchée, n'est peut-être plus aujourd'hui aussi justifiée qu'elle pouvait le paraître il y a seulement quelques années.

La réponse à cette question doit, en effet, dépendre de la manière dont nous concevons la nature du phénomène physique par lequel l'énergie se trouve acheminée d'un point à un autre le long des lignes électriques. Or, tandis que la notion d'un éther, au moins en tant que milieu préexistant à toute manifestation de champ, a dû être abandonnée, les récents développements de la mécanique ondulatoire, dans la voie brillamment ouverte par Louis de Broglie, font aujourd'hui considérer comme conciliables les points de vue auparavant incompatibles en apparence, des théories de l'émission et des ondula-

(1) Conférence faite devant le groupe du Sud-Est de la Société Française des Electriciens, le 28 janvier 1932.

tions, en y montrant deux aspects complémentaires, également vrais et nécessaires, de la même réalité.

D'autre part la vieille idée de Faraday, dont vient d'être célébré le centenaire, que les phénomènes d'induction trouvent leur interprétation la plus simple dans l'hypothèse d'un mouvement convenable des lignes du même nom, n'a jamais cessé de fournir au praticien un mode extrêmement suggestif et fécond de représentation des faits, bien que l'extension de cette notion au cas le plus général des champs variables ait paru longtemps se heurter à des difficultés insurmontables, qui tendaient à la faire abandonner par les théoriciens de la physique.

Or ces objections de principe paraissent aujourd'hui écartées grâce notamment aux recherches de S. R. Milner, qui a montré comment l'hypothèse d'un fractionnement du flux d'induction, non seulement en une gerbe de filets ou tubes de force élémentaires, mais encore, en une triple infinité de petites cellules ou éléments primordiaux distincts subdivisant les tubes de force eux-mêmes, permet, d'une part de définir sans ambiguïté ni contradiction le mouvement à assigner à ces petits éléments constitutifs du champ, d'autre part rejoint, par l'attribution naturelle à chacun d'un quantum d'action, le domaine le plus fondamental et le plus fécond de la physique théorique actuelle.

Ce progrès récent consacre ainsi, d'une manière heureuse pour l'électrotechnique, la légitimité d'un mode de représentation que son caractère sensible et son appel à l'intuition rendaient particulièrement précieux pour la découverte et l'invention et auquel le professeur et l'ingénieur n'eussent pas renoncé sans regret.

A ce point de vue d'un mouvement bien défini des éléments du flux d'induction, l'expression du flux d'énergie dans le champ, suivant le théorème de Poynting, prend une forme aussi simple et intuitive que dans le cas familier des milieux matériels. Dans le cas général, ce flux d'énergie à travers une surface fixe comprend en effet deux parts, l'une due au transport de l'énergie répartie dans le champ et qui accompagne le mouvement des éléments ou cellules, l'autre due au travail que développent dans ce mouvement les tensions ou pressions de Maxwell (2)

Aux faibles vitesses que réalisent, par exemple, le mouvement des corps électrisés ou des circuits parcourus par des courants, l'énergie est ainsi presque en totalité « transmise » par les tensions des champs

(2) Par exemple, pour le champ magnétique, la tension par unité de surface $\frac{BH}{8\pi}$ ou $\frac{\mu H^2}{8\pi}$ suivant les lignes de force, et la pression égale et de signe contraire suivant toute direction normale aux lignes de force.

électrique ou magnétique respectivement, tandis que dans le cas intermédiaire que réalisent les ondes électromagnétiques, ou la propagation le long des lignes au régime dit naturel, sans déphasage ou sans onde de retour, (caractérisé par la relation $I = \sqrt{C : L}\, V$, où I, V, C, L. désignent respectivement le courant par phase, la tension simple, la capacité et la self inductance par unité de longueur), les pressions de MAXWELL réelles ou intrinsèques (pour un observateur se mouvant avec le

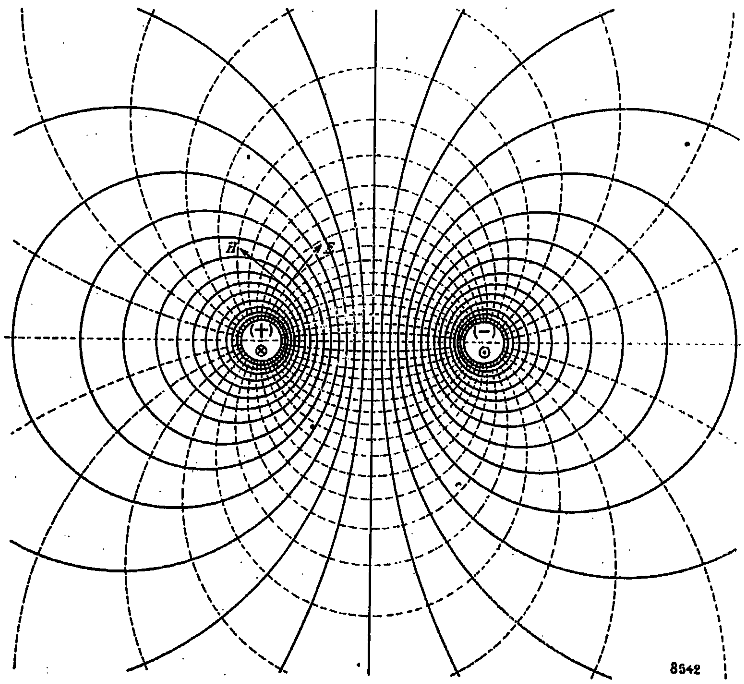


Fig. 1. — Champ électromagnétique d'une ligne bifilaire.
Les lignes orthogonales pleines et pointillées correspondent respectivement aux champs magnétique et électrique dirigés dans le plan de la figure, et auxquels est perpendiculaire le vecteur flux d'énergie de Poynting.

champ), s'annulent totalement (3) et le flux d'énergie y consiste entièrement dans un « transport » proprement dit à la vitesse de la lumière, au sein du diélectrique, des deux formes électrique $\left(\frac{kE^2}{8\pi}\right.$ par unité de volume$\left.\right)$ et magnétique $\left(\frac{\mu H^2}{8\pi}\right.$ par unité de volume$\left.\right)$ en lesquelles se divise également l'énergie du champ.

Considérons, pour fixer les idées (fig. 1) le voisinage immédiat d'un

(3) En particulier, la répulsion électrodynamique entre conducteurs y est exactement balancée par leur attraction électrostatique.

conducteur de ligne à haute tension à la surface duquel nous admettons que le gradient de potentiel efficace atteigne la limite correspondant à l'apparition des effluves, soit pratiquement 15 kV par cm ou 15000 : 300 = 50 u.e.s.

Puisqu'au régime sans déphasage les deux formes d'énergie ont même densité en tout point du champ ($E^2 = H^2$), le champ magnétique H le long de la surface du conducteur aura la même valeur numérique en unités e. m. ou oersteds, ce qui, en admettant que le conducteur soit constitué par un câble de 25 mm de diamètre, conduit à un courant efficace :

$$10 . \frac{50\pi \; 2,5}{4\pi} = 312 \text{ A}$$

par conducteur au régime de charge « naturel » de la ligne. Si celle-ci est triphasée à 220 kV, la puissance correspondante est :

$$220.312. \sqrt{3} = 122\,200 \text{ kVA}$$

Ce flux d'énergie qui, comme POYNTING l'a montré, est dirigé parallèlement aux conducteurs dans le milieu extérieur suivant la normale au plan de E et H, a pour densité, en exprimant cette fois E et H dans le même système d'unités, $\frac{EH}{4\pi}$ ou, ce qui revient au même dans le cas présent, $\frac{cE^2}{4\pi}$ ou $\frac{H^2}{4\pi c}$ (en unités e.s.), en désignant par c la vitesse de la lumière.

Le maximum au voisinage immédiat des conducteurs, a pour valeur (moyenne dans la période) :

$$\frac{50.3.10^{10}.50}{4\pi} = 293.10^{10} \text{ erg : s.cm}^2$$

ou

$$293 \text{ kW : cm}^2.$$

La presque totalité de ce courant d'énergie est donc pratiquement confinée dans une section de quelques dm^2 à peine autour de chaque conducteur.

A tout autre régime faisant prédominer l'une ou l'autre forme, électrique ou magnétique, du champ, la vitesse à assigner aux lignes d'induction sera inférieure à la vitesse de la lumière et s'annulera respectivement aux régimes extrêmes à vide et en court-circuit.

En même temps, le travail des pressions de MAXWELL, qui ne sont plus nulles, adjoindra au « transport » une part plus ou moins grande de « transmission » de l'énergie (4).

(4) Rappelons en passant que la vitesse du courant proprement dit, celle du mouvement moyen ou d'ensemble des électrons du conducteur, est de l'ordre de

2°. — *La force motrice : Son rôle dans l'économie industrielle.*

Retenons seulement de la digression qui précède, la conviction renforcée que le mode de transport par lequel l'énergie est transportée sous forme électromagnétique le long de fils conducteurs, avec de faibles pertes et sans dispersion, tient de sa nature « éthérée » les raisons qui expliquent qu'elle ait pu rapidement supplanter toutes les autres formes anciennes de transport de l'énergie.

La question des mérites respectifs du transport du combustible ou de l'énergie électrique n'est plus guère discutée aujourd'hui que sont envisagés de grands projets d'interconnexion couvrant des continents entiers, et dont l'exécution sera sans doute l'œuvre des prochaines années.

L'expression de pain de l'industrie, autrefois imaginée pour la houille, convient mieux aujourd'hui à l'énergie en général et l'abondance de la force motrice, en corrélation manifeste avec le niveau de vie des individus, demeure l'indice le plus constant de l'activité et de la prospérité d'un pays.

Bien mieux, des raisons d'ordre fondamental font présumer que cette importance ne cessera de croître dans l'avenir. En effet, quelque crédit que doive accorder l'imagination la moins optimiste aux transformations les plus imprévues à attendre d'un rythme sans cesse accéléré des découvertes, rien n'autorise à penser que doive s'y atténuer le rôle prééminent de l'énergie. Au contraire, tandis que les synthèses chimiques, la connaissance plus étendue des propriétés des corps, la découverte de succédanés, rendent sans cesse précaire le caractère indispensable de tel ou tel produit naturel — et les résultats à espérer, dans un avenir éloigné, des possibilités aujourd'hui entrevues de transmutation des éléments, renforceront encore cette constatation — l'évolution dans les procédés, ainsi que le recours croissant en tout domaine aux processus réversibles, se caractérisent toujours par une dépendance accrue et quasi inéluctable à l'égard de l'énergie ; cette grandeur physique, déjà si importante, paraît bien ainsi devoir constituer le facteur le plus constant et le plus fondamental de l'économie future.

Dans ces conditions, toute crainte de surproduction, quelque justi-

1/100 de mm par seconde seulement, et n'a donc aucun rapport avec la vitesse incomparablement plus grande ci-dessus qui est d'une part la vitesse de transport du champ, d'autre part l'un des facteurs de la transmission.

fiée que, par ces temps de désordre économique, elle puisse paraître à certains en d'autres domaines, semble, par contre, vaine en ce qui concerne l'énergie électrique.

Car, outre que tout le développement antérieur des emplois de l'énergie concourt à dissiper cette crainte, il n'y a rien d'absurde, dans le cas particulier présent, à imaginer que la consommation puisse poursuivre indéfiniment la progression assez remarquablement uniforme, d'environ 11 pour cent par an, qu'elle a montrée jusqu'à présent en tous pays, puisqu'il n'existe *à priori* aucune commune mesure entre nos besoins d'êtres humains et une quantité d'énergie, et qu'un mégawatt-heure par exemple, unité appropriée à certains débouchés considérables comme le chauffage domestique, n'est pas plus, en soi, hors de proportion avec notre organisme qu'un hectowatt-heure.

Retenons en passant ce caractère propre de l'utilisation de l'énergie, ainsi que cette constatation réconfortante pour l'ingénieur qui lui voue son activité, que tandis que beaucoup d'autres formes du progrès matériel, comme les transports ou les moyens de communication, prêtent souvent au reproche de bouleverser l'équilibre économique et social, la distribution électrique de l'énergie, tant par sa diffusion aisée que par son extrême discrétion, donne moins de prise aux justes préoccupations du conservateur et du moraliste.

3°. — *Influence de l'évolution moderne des centrales thermiques sur le transport de l'énergie et l'interconnexion.*

Le souci, justifié par le prix élevé des combustibles, d'en réduire à l'extrême la consommation, a tendu au cours de ces dernières années, à faire de la centrale thermique, par l'adjonction de perfectionnements successifs, soutirages de vapeur, réchauffage de l'air, emploi de hautes pressions et de hautes températures, resurchauffe de la vapeur, dégazage, etc., un ensemble complexe et délicat dont le prix d'installation n'est parfois guère inférieur à celui de certaines centrales hydrauliques, et dont la bonne utilisation requiert une charge relativement constante. C'est à cette condition expresse, souvent perdue de vue, que le prix de revient du kilowatt-heure thermique peut paraître moins élevé que celui du kilowatt-heure hydraulique, même en certains pays comme la Californie, qui, abondamment pourvus de houille blanche, le sont également par ailleurs de pétrole et de gaz naturel. Or, cette condition suppose en général l'existence simultanée

de centrales hydrauliques, susceptibles, par l'aptitude de leurs unités à être mises en route et branchées sur le réseau à pleine charge en une minute environ, par la réserve dont elles permettent de disposer inopinément, etc , de suppléer, vis-à-vis du réseau, au défaut de souplesse des centrales thermiques.

Ces raisons de principe doivent conduire à affecter à ces dernières centrales une charge de base, aussi constante que possible, du diagramme; si elles sont bien connues depuis quelques années, il s'en faut de beaucoup qu'elles soient généralement reconnues, notamment en France où les interconnexions sont loin d'en avoir tiré encore tout le parti possible.

C'est d'ailleurs la reconnaissance implicite de cette dépendance où le souci d'une utilisation rationnelle place les centrales thermiques vis-à-vis des centrales hydrauliques qui, après un discrédit momentané de ces dernières, leur fait de nouveau rendre justice en ce moment même aux Etats-Unis. Les lignes à haute tension sont donc assurées de devoir jouer toujours un rôle essentiel dans un tel ensemble, sans que leur utilisation risque d'en être amoindrie, car le développement logique des principes ci-dessus comporte, non seulement l'affectation de ces lignes au transport de la puissance de pointe des usines éloignées vers les centres urbains, mais encore, pendant les heures creuses, le transport en sens inverse de l'excédent de la charge de base des centrales thermiques sur les besoins de leurs réseaux locaux; cet échange permet ainsi de suppléer vis-à-vis des réseaux autrefois directement desservis par les centrales hydrauliques, à l'arrêt systématique de ces dernières, que leur faculté de se prêter en général, au moins à une accumulation diurne, doit faire réserver de préférence à leur rôle de centrales de pointe.

Cette utilisation dans les deux sens des lignes de transmission pourra se trouver renforcée si, comme il arrive fréquemment, la disposition d'un réservoir aval suffisant, en même temps que d'un réservoir amont même pour quelques heures de charge seulement, permet de doubler à très peu de frais l'usine hydroélectrique existante, d'une station d'accumulation par pompage.

De telles dispositions sont à développer pour tirer le meilleur parti possible de ce fait fondamental, dont les tarifications existantes tiennent rarement un compte suffisant, que l'énergie électrique, d'une accumulation difficile, a une valeur instantanée dont le cours, très variable pendant la journée, est par contre relativement uniforme en

tous points à un instant donné ([5]), grâce à sa distribution aisée et au rendement instantané élevé de la transmission.

Considérons, pour fixer les idées (fig. 2), la conjugaison par une

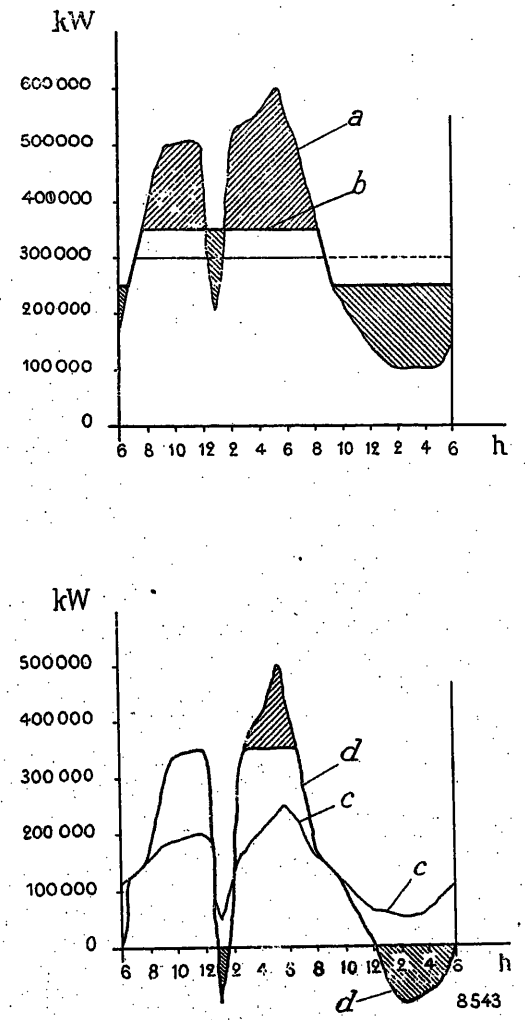


Fig. 2. — Diagrammes de charge de deux réseaux interconnectés avec centrale thermique et hydraulique.

a, charge du réseau urbain.
b, charge de la centrale thermique.
c, charge du réseau de la région hydraulique.
d, charge de la centrale hydraulique.

(5) Au moins en ce qui concerne le prix de revient « marginal » imputable à un petit accroissement virtuel de la consommation, et qui, indépendant des charges fixes dont dépend l'extrême différence des tarifs suivant la grandeur de la puissance souscrite, devrait seul entrer en ligne de compte dans l'établissement des tarifs dégressifs destinés à encourager la consommation.

ligne à haute tension de deux ensembles thermique et hydraulique de centrales placés chacun au centre de réseaux de distribution présentant les diagrammes de charge journalière *a* et *c* avec des pointes respectives de 600 000 et 250 000 kW. L'interconnexion, pour une puissance échangée maxima de 250000 kW, permettra de n'équiper la centrale thermique que pour une puissance de 350 000 kW en lui assurant par contre une marche à cette pleine charge pendant 12 h par jour de 8 h du matin à 8 h du soir ; une fraction importante de cette charge, environ 70 pour cent, soit 250 000 kW, peut être maintenue pendant le reste des 24 h, en faisant concourir comme nous l'avons dit la ligne de transmission au retour vers le réseau à alimentation hydraulique de l'excès de la production thermique de nuit sur les besoins du réseau local. Le diagramme de charge de la centrale thermique est ainsi représenté par la courbe *b*, auquel correspond le facteur de charge diurne exceptionnellement favorable de 85 pour cent, tandis que la charge hydraulique est représentée par la courbe *d* ; la présence d'ordonnées négatives requiert l'adjonction d'une installation de pompage pour une puissance d'environ 100 000 kW ce qui permet, en absorbant dans les zones hachurées environ 450 000 kWh et en en récupérant les 2/3, de réduire la pointe résultante d'environ 150 000 kW et de ramener ainsi la puissance de la centrale hydraulique proprement dite à 350 000 kW. L'utilisation de la ligne est encore d'environ 3 500 h par an pour la puissance maximum échangée de 250 000 kW.

Choix du mode et de la tension de transmission

Bien que le recours au courant continu pour le transport d'énergie ait été limité jusqu'à présent à quelques applications peu étendues du système Thury à intensité constante, il paraît probable aujourd'hui que les progrès récents des soupapes à vapeur de mercure à commande par grille permettront, dans un avenir peut-être peu éloigné, de réaliser la célèbre prédiction de lord Kelvin de l'ultime prééminence en ce domaine du courant continu.

Les avantages de principe en sont bien connus : tension efficace $\sqrt{2}$ fois plus grande pour une même tension critique d'effluves, suppression de l'effet de peau dans les conducteurs de forte section, et, surtout, possibilité de réaliser des lignes souterraines pour des tensions très élevées avec des épaisseurs modérées d'isolant.

Toutefois, la supériorité pratique actuelle de l'emploi du courant triphasé peut trouver un appui nouveau dans le développement pro-

chain de l'application des condensateurs statiques, dont les risques de fonctionnement et le prix, déjà très réduits, sont destinés sans doute à diminuer encore sensiblement. L'emploi en peut être ainsi envisagé, concurremment avec celui de bobines d'induction statiques aux faibles charges, pour la compensation de la puissance réactive des lignes, à la place de compensateurs synchrones, c'est-à-dire de machines tournantes, avec l'avantage de pertes moindres et d'une mise en ou hors service plus aisée.

A chaque valeur de la tension U en kilovolts, correspond un régime de charge naturel ou caractéristique, dont la valeur $P \backsimeq 2,5\ U^2$ en kilowatts pour une ligne aérienne triphasée, par exemple 120 000 kW à 220 kV, est indépendante de la fréquence; ce régime, dit sans onde de retour ou sans déphasage, réalise une compensation mutuelle des énergies électrique et magnétique de la ligne. L'extension de cette compensation à tout le système nécessite, en raison de la prépondérance dans les réseaux de distribution, de l'énergie magnétique présente dans les circuits magnétiques et dans les flux de dispersion des machines ou transformateurs, un contre-poids correspondant sous forme de capacités additionnelles, ou une réduction de la charge des lignes, y laissant prédominer la puissance réactive capacitive. Réalisée intégralement pour l'ensemble, elle réalise en fait cette résonance à la fréquence fondamentale que Maurice Leblanc proposait déjà en 1900 comme mode normal de fonctionnement des grands réseaux.

Il est bien admis que l'adoption aujourd'hui générale d'une telle compensation, en des points convenablement espacés sur les lignes les plus longues, en rend le fonctionnement indépendant de la fréquence, de sorte que même les distances les plus considérables de transmission ne justifient nullement un recours à des fréquences exceptionnelles réduites comme 16 2/3 ou 25 p:s.

Bien mieux, les progrès incessants des propriétés magnétiques du fer justifieraient plutôt un recours à des fréquences plus élevées que celles normales actuelles de 50 ou 60 p : s. En effet, tandis que les découvertes modernes ne laissent entrevoir aucune probabilité de réduire beaucoup les résistivités des conducteurs et les pertes Joule qui en dépendent, la meilleure compréhension actuelle de la nature physique des pertes par hystérésis et de leur caractère accidentel, permet d'escompter que le rapport des pertes dans le fer aux pertes dans le cuivre dans les machines, déjà inférieur à l'unité, continuera à décroître. Or, l'égalité de ces pertes, dont dépend l'obtention du rendement maximum, ne pourra être rétablie que par une élévation de la fréquence qui procu-

rerait par surcroît, outre l'augmentation du rendement, une réduction du poids et du prix des machines, et étendrait utilement la gamme des vitesses réalisables directement.

Le souvenir des difficultés auxquelles a donné lieu l'unification des fréquences, aujourd'hui heureusement en majeure partie achevée dans la plupart des pays, pourrait faire considérer cette question comme inopportune; mais, les ressources à attendre du développement futur des soupapes à grille commandée pour la conversion en courant continu ou d'une fréquence à une autre, permettent d'escompter que ce problème pourra quelque jour prochain être pris de nouveau utilement en considération.

1°. — *Avantage des très hautes tensions.*

Parmi les avantages bien connus des très hautes tensions, l'expérience de ces dernières années a surtout fait ressortir comme particulièrement important pour la pratique, le fonctionnement relativement plus aisé des interrupteurs à très haute tension et l'influence favorable de la capacité sur leur pouvoir de coupure. Ce dernier facteur, dont l'influence, bien que connue en principe depuis longtemps, n'a été étudiée qu'assez récemment, joue un rôle capital qui ne doit pas être perdu de vue dans l'évaluation des résultats d'essais fournis par les stations spéciales de grande puissance que divers constructeurs ont réalisées en vue de l'étude systématique et de l'épreuve des interrupteurs.

En effet, la capacité de ces installations, beaucoup plus faible que celle des réseaux auxquels sont destinés ces appareils, conduit à des fréquences propres d'oscillation du système beaucoup plus élevées et d'autant plus grandes que l'inductance de la machine est plus réduite ou que sa puissance est plus considérable. Comme l'un des facteurs de la puissance de coupure est la tension aux bornes de l'interrupteur immédiatement après extinction de l'arc, la vitesse avec laquelle réapparaît cette tension, et qui dépend de la période d'oscillation, joue également un rôle considérable sur le pouvoir de coupure, qui est naturellement d'autant moindre que cette vitesse est plus élevée. La prise en considération de ce facteur essentiel est donc indispensable à une juste appréciation de la sécurité réelle qu'implique, pour le fonctionnement des interrupteurs à très haute tension dans les réseaux, l'essai préalable dans les conditions beaucoup plus sévères des stations d'essai de court-circuit de grande puissance (6).

(6) Influence de la forme de la tension de rupture sur le travail des disjoncteurs J. Kopeliowitch. Bull. A. S. E. t. XXII, p. 312 (1931).

2°. — *Position actuelle des problèmes de la stabilité et de la sécurité.*

L'extension croissante des distances de transmission et l'augmentation corrélative des réactances intercalées entre les tensions des centrales ainsi interconnectées, ont fait surgir il y a peu d'années le problème de la stabilité de fonctionnement des longues lignes, non seulement à l'égard des surcharges en régime normal, mais encore vis-à-vis des incidents, comme la mise à la terre d'une phase ou le court-circuit entre phases, qui réduisent la puissance limite synchronisante entre stations.

La solution de ce problème qui a donné lieu, notamment aux Etats-Unis, à un nombre considérable de travaux théoriques et expérimentaux, a été généralement cherchée dans l'emploi de compensateurs synchrones convenablement répartis le long des lignes, ainsi que dans un retour, sous les noms de superexcitation, excitation rapide, à des procédés dérivés du compoundage, et tendant à préserver l'intégrité du flux et de la force électromotrice interne des machines, des conséquences de la réaction d'induit accrue, due à la surcharge ou aux défauts.

L'importance de cette question paraît d'ailleurs dès à présent bien diminuée, depuis que les progrès de la construction et les tendances des exploitants ont fait passer au premier plan une prompte élimination des défauts par l'emploi de relais sélectifs et d'interrupteurs à coupure rapide.

En effet, outre l'intérêt évident de réduire, notamment sur les lignes aériennes, les dégâts matériels dus aux courts-circuits, comme la détérioration ou même la rupture éventuelle des conducteurs, une sélection quasi instantanée des défauts permet aux diverses machines de se maintenir approximativement en synchronisme, grâce à leur moment d'inertie naturel, même sans puissance synchronisante appréciable, et de pouvoir ensuite reprendre au bout d'un temps suffisamment court la marche en parallèle avec des valeurs presque normales de leur flux et de leur tension, par le simple jeu de l'inertie magnétique qu'assurent les courants naturellement induits dans les circuits inducteurs et amortisseurs du rotor, sans le concours d'aucune action particulière de l'excitatrice ou d'un régulateur.

Ces progrès récents tendent à réaliser, dans les réseaux bouclés à nterconnexion suffisamment étendue et serrée, une continuité de service quasi absolue même sur les tronçons de ligne généralement

courts directement affectés, et sauf dans le cas relativement rare de défauts persistants nécessitant une élimination définitive de la section défectueuse.

Construction des lignes a très haute tension

1°. — *Conducteurs.*

Pour éviter des pertes d'énergie excessives par effet de couronne, avec leurs conséquences nuisibles (ionisation de l'air, corrosion, bruissement, perturbations radiophoniques), il est nécessaire de limiter le gradient de potentiel maximum à la surface du conducteur par l'emploi d'un diamètre suffisant (environ 25 mm pour

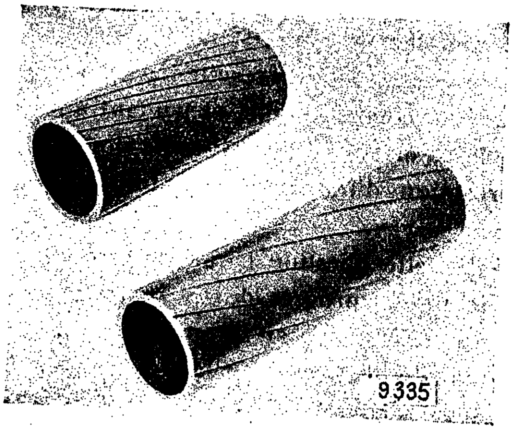


Fig. 3. — Conducteurs creux, système Brown Boveri, sans armature interne, pour ligne à très haute tension (diamètre 42 mm, section utile 400 mm² de cuivre).

220 kV). Cette circonstance, qui favorise l'emploi de l'aluminium, a donné naissance d'autre part aux conducteurs creux constitués, comme les câbles clos en acier pour les puits de mines, par des torons méplats convenablement profilés et, soit reposant sur une âme intérieure, soit assemblés mutuellement par rainure et languette à la manière d'un parquetage (fig. 3 et 4).

Ces câbles réalisent ainsi une surface extérieure lisse favorable au point de vue de l'effet de couronne.

Par contre ils paraissent plus sujets aux vibrations accidentelles que déterminent, surtout avec les fortes tensions de pose, les vents faibles et modérés. L'explication de ces vibrations, aujourd'hui bien connue, les rattache à la même cause que les sons éoliens que rendent parfois

sous des vents assez forts, les fils télégraphiques, à savoir la formation dans le sillage de l'obstacle cylindrique que constitue, en travers du vent, le conducteur, de tourbillons qui, se détachant alternativement d'un côté et de l'autre du profil, donnent lieu dans un plan vertical à une réaction alternative de même période sur le conducteur. Le fait que la fréquence de ce phénomène et la vitesse critique du vent qui lui donne naissance, sont beaucoup plus faibles pour les grosses lignes

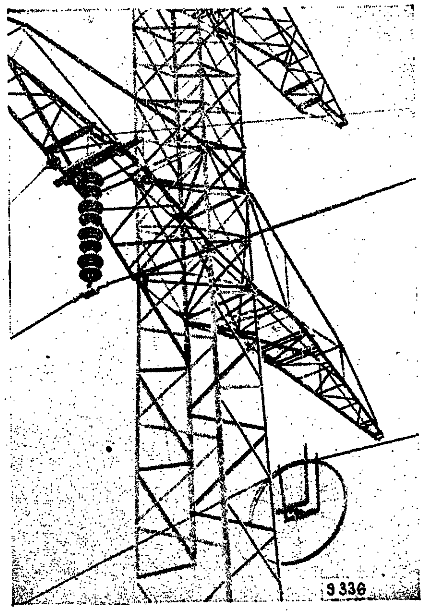


Fig. 4. — Montage des conducteurs de la fig. 3
avec des poulies de grand diamètre, sur une ligne à 380 kV.

industrielles que pour les fils, tient aux conditions de similitude aérodynamique de Reynolds, d'après lesquelles les mêmes manifestations se produisent, pour un même fluide, aux mêmes valeurs du paramètre *vd*, produit de la vitesse du courant par le diamètre *d* de l'obstacle.

Le remède à ces manifestations, parfois gênantes en raison des ruptures par fatigue auxquelles elles risquent de donner lieu aux points d'attache des câbles, a été généralement cherché dans des modifications du mode d'attache, tendant à réduire les moments de flexion locaux, ou dans l'adjonction d'amortisseurs, ressorts ou dash-pots, au voisinage de ces points de fixation du conducteur.

Mais il serait préférable de chercher à prévenir ces vibrations par

une étude préalable systématique, dans les souffleries aérodynamiques, de modèles de formes variées de sections de conducteurs.

On sait déjà que les câbles ordinaires formés de fils juxtaposés sont moins sensibles que les câbles lisses aux vibrations, et le Pr D. THOMA a montré également que l'immunité était totale pour des sections creuses perforées de trous ou encore en forme de trèfle, qui ne représentent évidemment que des exemples parmi les nombreuses formes

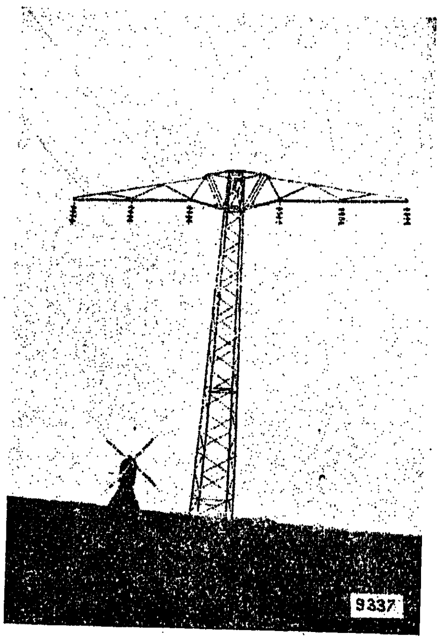


Fig. 5. — Pylônes à bras articulés de l'A. E. G.

équivalentes, peut-être plus convenables, auxquelles conduirait sans doute une étude plus étendue.

2°. — *Supports.*

L'évolution continue vers une construction plus légère et une conception plus rationnelle de l'ensemble mécanique, conducteurs et supports, a conduit, d'une part à l'augmentation des portées, d'autre part à diverses solutions (fig. 5 et 6) tendant à épargner plus ou moins aux supports les efforts accidentels dus aux ruptures de conducteurs.

Parmi ces solutions celle avec bras articulés de l'A.E.G. (fig. 5) qui a reçu diverses applications en Allemagne et récemment aux Etats-

Unis, consiste à rendre mobiles autour de charnières, un peu inclinées sur la verticale, les consoles supportant les chaînes d'isolateurs, de sorte que la rotation de ces bras, en cas de rupture de conducteurs, soustrait en partie le fût du pylône aux efforts longitudinaux et aux moments de flexion que subirait dans les mêmes conditions un pylône ordinaire.

Mais la solution la plus radicale, qui conduit au minimum de poids, à la meilleure définition des contraintes et à l'appropriation la plus complète des supports aux efforts normaux, est celle que nous avons décrite dans notre mémoire de 1923 au Congrès des Grands Réseaux

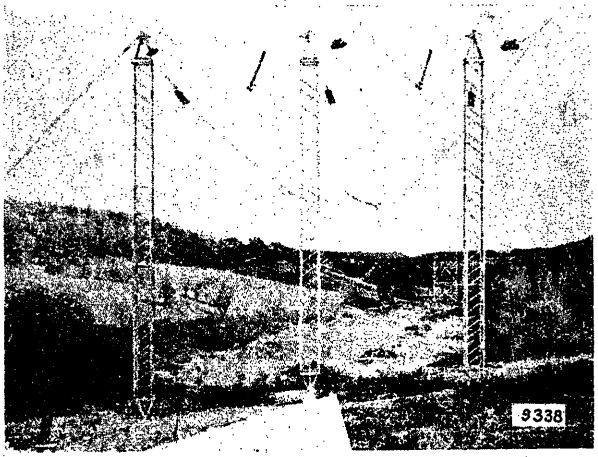


Fig. 6. — Pylônes d'angle haubannés montés sur rotule (ligne de Wallenpaupack à Siegfried, Pensylvanie).

(fig. 7) et qui, ayant fait l'objet d'une courte ligne d'expériences au Bourget à laquelle se référait une nouvelle communication aux Grands Réseaux en 1927, vient d'être appliquée en Algérie à une ligne à 90 kV décrite ci-dessous.

3°. — *Description de la ligne* 90000 V *sur pylônes articulés d'Oued-Keberit à Aïn-Chenia.*

La ligne d'Oued-Keberit à Aïn-Chenia (Algérie, département de Constantine), établie pour le compte de la Compagnie du Bourbonnais par la Compagnie d'Entreprises Electro-Mécaniques, prolonge de 12 km la ligne principale à 90 kV de 100 km environ qui, de Bône à Oued Damous, dessert les sous-stations de traction de la ligne en cours d'électrification, Bône-Tebessa, des Chemins de fer algériens de l'Etat.

La ligne traverse une région boisée assez accidentée présentant en

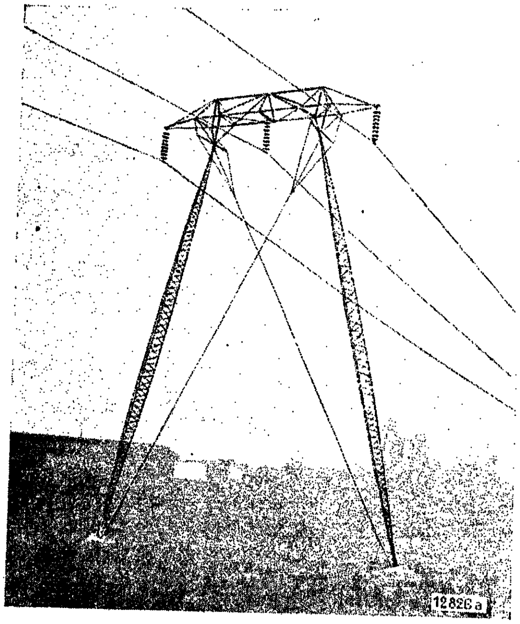


Fig 7. — Pylône articulé de la ligne d'essai du Bourget.

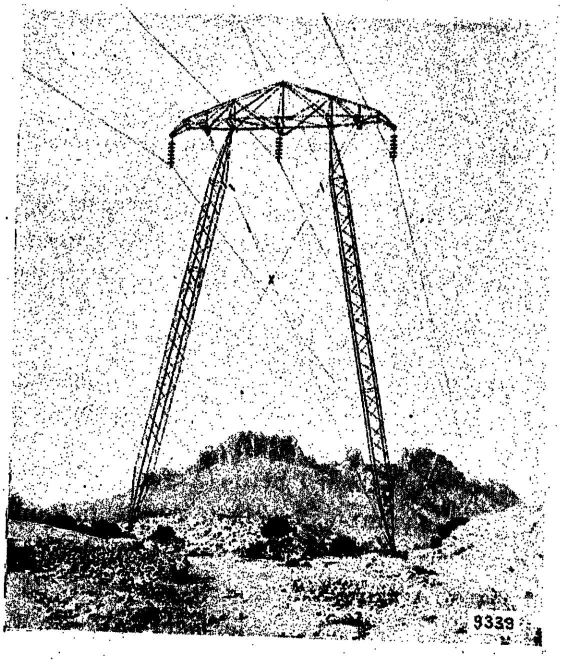


Fig. 8. — Pylône d'alignement articulé de la ligne d'Oued-Keberit à Aïn-Chenia (Algérie).

certains points des falaises abruptes qui dominent des ravins dont le franchissement a permis quelques grandes portées; les transports de matériel y étaient donc assez difficiles.

Les 3 conducteurs, en aluminium-acier de 238 mm², sont disposés en nappe horizontale à 4 m environ d'écartement, suivant le mode d'armement très répandu en Amérique et d'une manière générale dans les pays neufs où le prix du terrain entre peu en ligne de compte; cette disposition n'a pas pu se développer en Europe à cause de cette

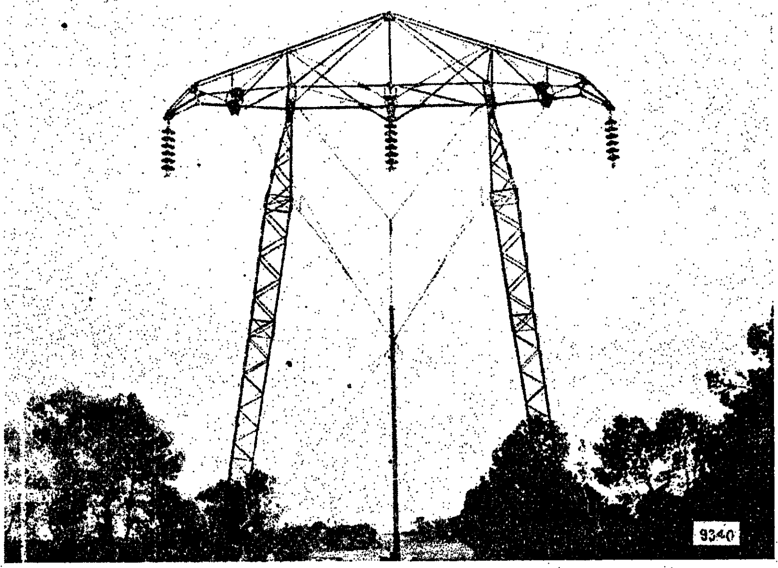


Fig. 9. — Tête du pylône de la fig. 8.

sujétion qui provient seulement de l'emploi de 4 pieds, malgré ses avantages bien connus de réduction de la hauteur des supports, moindre distance au sol réduisant les tensions induites par la foudre, enfin élimination du risque de contact accidentel par balancement vertical dû à la décharge brusque du givre.

Les pylônes courants, du type articulé, sont conformes dans leurs grandes lignes à la description que nous avons donnée de ce système dans nos deux rapports antérieurs à la Conférence internationale des Grands Réseaux en 1923 et 1927.

Ils comprennent (fig. 8 et 9) un portique constitué par deux montants fuselés de 15 m terminés à leurs deux bouts par des articulations et reliés à leur partie supérieure par une traverse de 8 m portant

en tête un câble de terre. Deux haubans croisés suivant les diagonales de ce trapèze contreventent l'ensemble.

Les points d'attache des chaînes d'isolateurs, de 1 m environ, supportant les conducteurs sont placés un peu en-dessous du niveau des articulations supérieures avec lesquelles ils se trouvent ainsi presque alignés, de sorte que, quels que soient les efforts normaux ou accidentels qui s'exercent sur la traverse, la stabilité propre de cette dernière, confirmée par les pattes d'oie qui dédoublent les haubans à leur partie supérieure, demeure assurée.

Enfin, deux attaches supplémentaires, partant chacune d'un point du

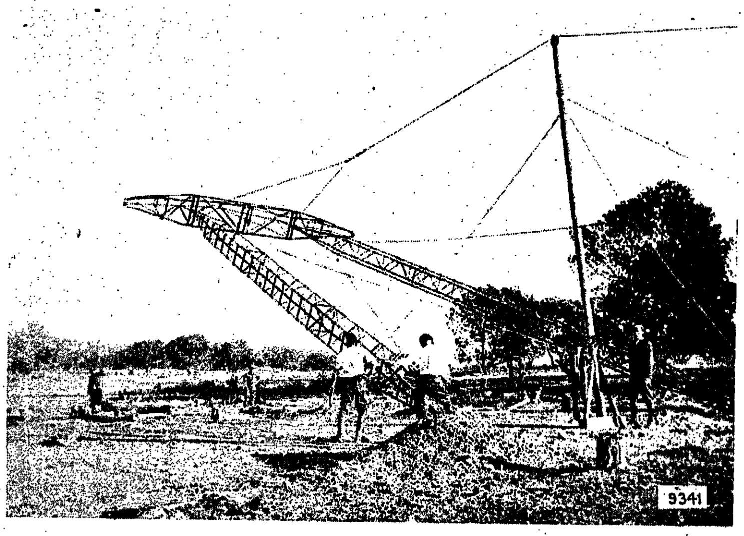


Fig. 10. — Levage d'un pylône articulé.

câble de terre à quelques mètres de part et d'autre de la traverse et rejoignant les membrures inférieures de cette dernière, sont destinées à prévenir toute inclinaison excessive de la traverse en cas de contrainte dissymétrique, due par exemple à une rupture partielle du système des conducteurs.

La portée normale est d'environ 270 m et la flèche correspondante d'environ 6 m.

Le nombre maximum de portées consécutives articulées entre pylônes d'arrêt ordinaires est de 7 en raison de diverses limitations inhérentes au tracé particulier de la ligne, (traversées, changements brusques de direction) mais il pourrait être beaucoup plus élevé sans que la stabilité fût compromise.

Le montage (fig. 10), favorisé par la légèreté des éléments consti-

tuants du pylône, dont l'ensemble pèse 740 kg., s'est effectué comme, pour une ligne ordinaire, en maintenant seulement les pylônes haubannés pendant le déroulage des conducteurs et jusqu'à la fixation sur pinces des conducteurs, tout au moins des deux latéraux. En dépit de délais inévitables, dus tant à l'adaptation de l'équipe de montage au nouveau système qu'à la nécessité de menus essais et tâtonnements, il est apparu bien vite que le levage des pylônes articulés d'une ligne plus longue s'effectuerait en fait sensiblement plus vite que celui des supports d'une ligne ordinaire.

Un facteur favorable, qui tient au principe même de la ligne articulée, réside dans la simplification des réglages; en effet, avec les pylones rigides, les retouches à la fixation des pinces sur les conducteurs effectuées sur un support, modifiant l'inclinaison des chaînes, entraînent une modification du régime des tensions le long de la ligne, d'où résultent des répercussions non négligeables sur les supports voisins, et la nécessité de procéder sur les chaînes déjà réglées à des retouches qui empêchent de parvenir à un résultat satisfaisant autrement que par approximations successives, et qui font perdre du temps.

Avec les pylônes articulés par contre, dès que la ligne a reçu sa tension de pose définitive entre pylônes d'arrêt, il suffit de placer les pinces dans le plan vertical des articulations inférieures, pour être assuré que le pylône, libéré de ses haubans, se placera de lui-même et d'emblée dans ce même plan sous l'effort de rappel des chaînes d'isolateurs dont la position d'équilibre est nécessairement contenue dans le plan du pylône. Le réglage des pinces est ainsi obtenu immédiatement sans nécessiter d'allées et venues le long de la ligne; en effet, si une erreur de 10 cm sur la fixation d'une pince détermine, avec un point d'attache supérieur invariable, une inclinaison de 10 pour 100 pour une chaîne de 1 m de long, ce qui n'est guère acceptable, le déplacement qui résulte pour la tête d'un pylône articulé de 15 m de haut de la non-correction de cette erreur, est absolument insensible à l'œil, et sans aucune conséquence appréciable sur la composante horizontale de la tension longitudinale du câble de part et d'autre de la chaîne.

Le principe de la construction articulée, qui vise à rendre homogène la sécurité de tout l'ouvrage constitué par la ligne, et autant que possible uniformes les coefficients adoptés pour ses diverses parties, conduit logiquement à considérer la rupture d'un conducteur comme aussi anormale et fatale à l'ensemble que celle d'un support. Toutefois, par concession à l'usage établi qui considère l'intégrité des

conducteurs comme impossible à garantir absolument, et fait passer au premier plan la sauvegarde des supports, nous avons admis la rupture exceptionnelle d'un conducteur, comme ne devant pas entraîner de conséquence plus grave, telle que la chute de l'ensemble compris entre pylônes d'arrêt.

Le cas le plus défavorable, dont la probabilité, dans le cas de la ligne actuelle, est inférieure à 1 : 7 (si l'on envisage comme également probables les ruptures d'un câble quelconque dans une portée quel-

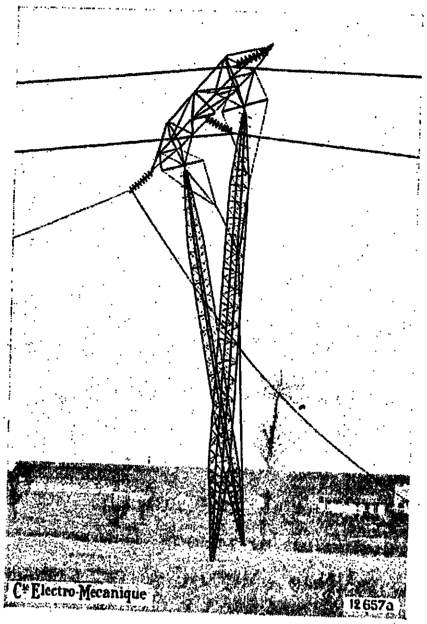


Fig. 11. — Pylône de la ligne d'essai après rupture d'un conducteur.

conque), consiste en la rupture d'un conducteur latéral dans l'une des portées adjacentes à un support d'arrêt.

Dans cette éventualité (fig. 11), les traverses des supports articulés se portent d'un mouvement d'ensemble du côté opposé à la portée rompue et prennent en même temps une certaine obliquité par rapport à la ligne de manière à réduire la tension des conducteurs latéraux et à réaliser pour l'ensemble une disposition de moindre contrainte. Les conditions sont donc plus favorables que pour une ligne ordinaire, non seulement parce que les efforts résiduels sont moindres, mais encore parce que le mouvement d'effacement des traverses, outre qu'il réduit ces efforts, augmente les périodes d'oscillations du système mécanique et rend ainsi plus progressive l'apparition de ces efforts

dynamiques, dont l'application brusque est souvent désastreuse pour les bras ou consoles des pylônes rigides. Les isolateurs, les attaches... etc., bénéficient également de cette réduction d'effort.

L'essai a d'ailleurs été réalisé au cours du montage (fig. 12) et a permis de vérifier que les contraintes correspondant pour le conducteur médian et le câble de terre à ces conditions exceptionnelles et anormales, étaient à peu près conformes à celles calculées, et laissaient subsister un coefficient de sécurité voisin de 3, largement suffisant.

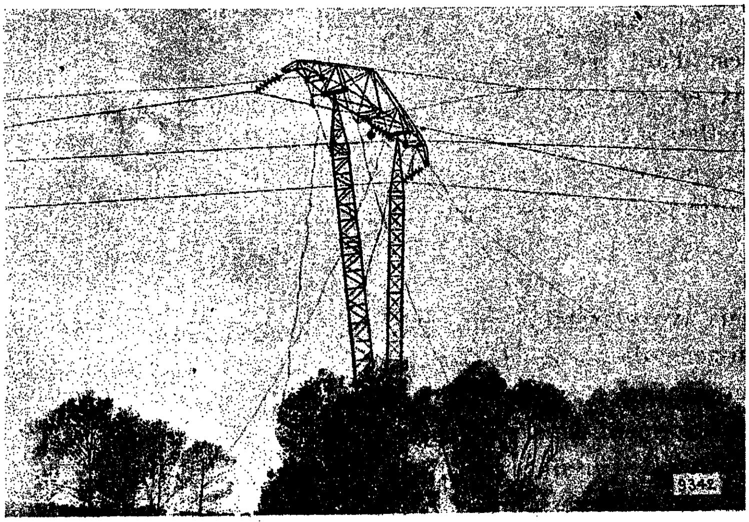


Fig. 12. — Pylône de la ligne d'Oued-Keberit après rupture d'un conducteur.

4°. — *Comparaison entre les lignes sur pylônes articulés et les lignes ordinaires.*

Nous ne reviendrons pas sur les avantages de principe de la solution articulée, que nous avons assez longuement exposés dans nos deux communications antérieures, sinon pour mentionner que, comme nous le faisions déjà ressortir en 1927, l'évolution de la construction des lignes en tous pays a plutôt confirmé au cours de ces dernières années le bien-fondé des directives qui nous avaient servi de base.

Si l'idée initiale était principalement de favoriser l'établissement de lignes de plus forte section, satisfaisant à la règle de lord Kelvin que des considérations plus terre à terre amenaient alors trop souvent à sacrifier, le développement logique de la nouvelle construction a fait ressortir, comme il arrive souvent pour toute proposition viable, des conséquences d'un autre ordre, souvent plus importantes.

Nous nous bornerons, dans ce qui suit, à l'exposé de ces aspects de la question, que l'étude de la ligne ci-dessus décrite nous a fait reconnaître comme plus particulièrement intéressants.

Comme nous l'avons indiqué déjà à diverses reprises, le fait que le poids et le prix d'un pylône articulé croissent moins vite en fonction de la hauteur que pour un pylône ordinaire, favorise l'adoption, désirable par ailleurs, de plus grandes portées.

En même temps, chaque support, devenant plus fort, échappera mieux à l'objection éventuelle de comporter des éléments trop grêles, même si le calcul les fait cependant ressortir comme suffisants.

Il est d'ailleurs à remarquer que les grandes portées permettent mieux, en général, d'adapter le profil de la ligne aux formes du terrain, en mettant à profit tous les points hauts et dispensant de devoir placer des supports dans les bas-fonds, de sorte que la hauteur moyenne des supports pourra bien souvent, en terrain accidenté, demeurer notablement inférieure à ce qu'elle devrait être dans le cas d'un terrain plan.

Nous avons examiné en 1924 l'emploi avec un conducteur aluminium-acier de portées de 600 m, et à cet égard l'emploi d'un tel câble à section d'acier renforcée ou à plus haute résistance, suivant l'exemple que donnent dans ce sens la pratique du labourage par treuil, ou l'évolution de certaines constructions récentes en béton armé, paraît devoir offrir des ressources intéressantes, de même que l'emploi de l'almélec seul, ou combiné à une âme d'acier.

Le grand empattement des pylônes-chevalet qui leur confère naturellement une grande résistance dans le sens transversal à la ligne, peut d'autre part être mis à profit, en faisant concourir les supports normaux d'alignement à la réalisation des changements de direction de la ligne, tout au moins partiellement, ce qui peut dispenser d'un grand nombre de pylônes d'angle spéciaux.

Ainsi, tandis qu'un changement de direction de 300 nécessite d'ordinaire un pylône d'arrêt, ce dernier pourra être souvent remplacé, par exemple, par trois pylônes articulés se partageant la déviation totale. Or, un angle de 10° est parfaitement compatible avec l'emploi de pylônes ordinaires d'alignement munis de chaînes de suspension, car l'inclinaison de ces dernières n'atteindra pas en général dans ces conditions 45° pour des supports au même niveau, et d'autre part les conditions d'équilibre de l'ensemble des portées articulées sur un semblable tracé incurvé demeureront pratiquement les mêmes que pour un tracé rectiligne ordinaire (l'effet de la déviation relève

du cosinus du demi-angle correspondant, qui dans les hypothèses ci-dessus ne diffère pas appréciablement de l'unité).

Rappelons que la conservation des chaînes de suspension à la place des chaînes d'arrêt, est non seulement économique, mais favorable à la sécurité de service (moindre contrainte des isolateurs, flexibilité de la ligne, moindre fatigue des conducteurs à l'égard des chocs longitudinaux ou des vibrations).

Dans le cas fréquent où le terrain présentera une déclivité transversale descendant vers le côté convexe du tracé, il sera convenable d'incliner

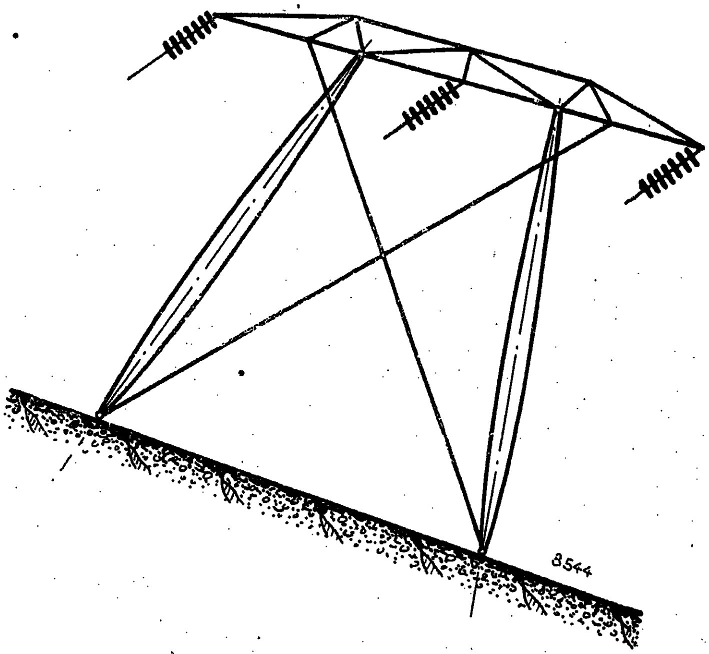


Fig. 13. — Montage d'un pylône articulé normal sur terrain en déclivité transversale et avec changement de la direction de la ligne.

tout le pylône vers l'extérieur (fig. 13) ce qui, en augmentant les distances des conducteurs à la masse, et rapprochant le plan des conducteurs d'un plan parallèle au terrain, fera concourir partiellement le poids du support et la réaction des montants, à soulager le hauban diagonal intéressé, de la composante latérale due à la tension des conducteurs. Cette disposition, loin d'être choquante au point de vue esthétique, paraîtra au contraire naturelle et satisfaisante si, conformément à l'idée directrice même du système, le pylône est envisagé, non comme une tour se suffisant à elle-même et ayant sa raison d'être propre, mais comme un organe subordonné et accessoire de la ligne, dont les con-

ducteurs, éléments principaux, retiennent par ailleurs d'autant mieux l'attention qu'ils sont plus gros vis-à-vis de supports de plus en plus légers et effacés.

La situation est ici assez analogue à ce qu'elle est pour la culée d'un pont qu'il est satisfaisant pour l'œil, en même temps que logique, de voir inclinée dans la direction de la retombée de l'arc (fig. 14), tandis

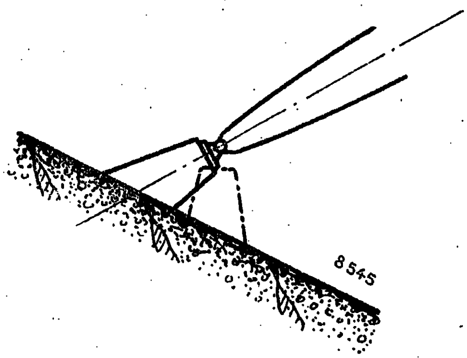


Fig. 14. — Inclinaison naturelle des culées d'un arc.

qu'il serait éminemment choquant, même pour les plus profanes, de la traiter comme un piédestal.

De semblables dispositions, que suggère le principe même de l'invention, contribueront, en mettant mieux en valeur ses ressources propres, à réaliser plus heureusement une adaptation aisée, naturelle et harmonieuse du tracé et du profil de la ligne aux formes du terrain, sur lesquelles les conducteurs, non astreints à la rigidité artificielle d'un tracé trop géométrique et anguleux, paraîtront s'être modelés sans contrainte.

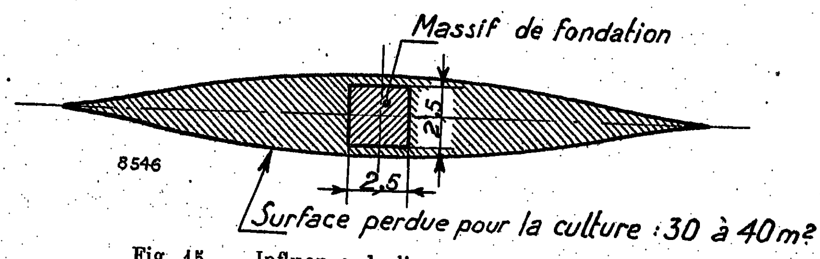


Fig. 15. — Influence de l'empattement d'un pylône sur la surface perdue pour la culture.

5°. — *Implantation des supports.*

La gêne qu'apporte aux cultures l'implantation des supports dépend de leur encombrement en plan, et plus particulièrement de celui de leurs massifs de fondation.

Même dans le cas où le massif se trouve orienté dans le sens même

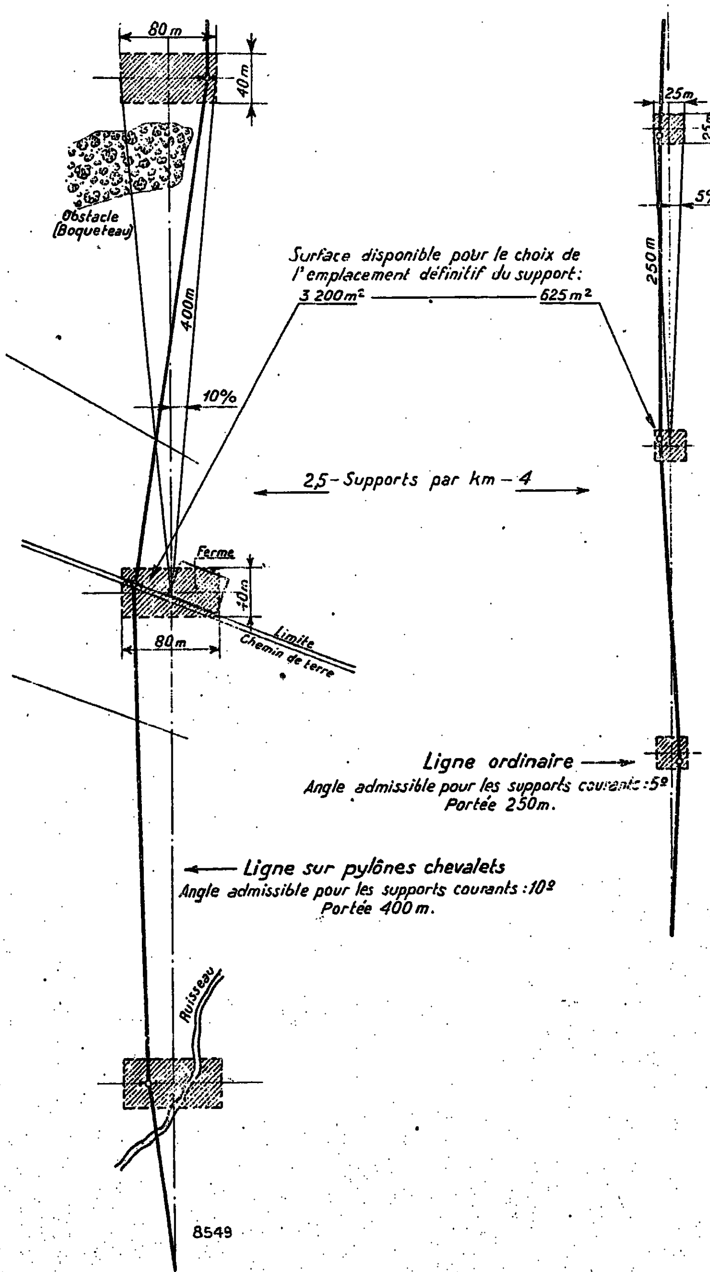


Fig. 16. — Ressources respectives pour la trace de la ligne des pylônes ordinaires ou à grand empattement transversal.

des cultures, la surface ainsi perdue par l'obligation pour la charrue de contourner le massif, est, surtout avec le labourage mécanique de

plus en plus répandu, bien supérieure à la surface même du massif, et peut atteindre (fig. 15) pour un massif de 2 m 50 de côté, environ 30 à 40 m².

De ce point de vue, le pylône articulé est avantageux, d'abord en raison de l'emploi de portées plus grandes et de la possibilité d'admettre, même avec les pylônes courants, une certaine déviation par rapport au tracé rectiligne, ce qui, comme l'indique la figure 16, procure une latitude beaucoup plus grande pour choisir l'emplacement de chaque support, et offre plus de ressources pour éviter les points gênants, se porter aux limites de parcelles, etc.

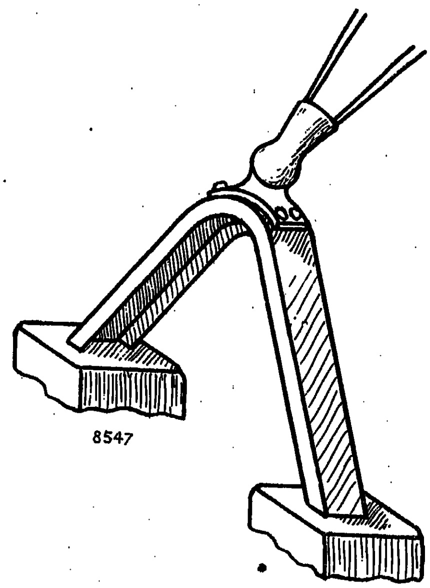


Fig. 17. — Emploi d'une rotule surélevée.

D'autre part, l'encombrement presque nul du pylône dans le sens longitudinal, grâce à la faible dimension des deux massifs, permet, en labourant parallèlement au plan du pylône, d'utiliser presque toute la surface. Lorsque la direction des sillons est imposée, il sera souvent possible d'y subordonner celle des supports si cette direction ne s'écarte pas trop de la normale à la ligne, de manière que la distance des conducteurs à la masse et l'influence sur la stabilité qui toutes deux dépendent du cosinus de l'écart angulaire de ces deux directions, ne soient pas altérées de manière sensible.

S'il n'en est pas ainsi, les engins de culture pourront encore atteindre toute la surface en passant entre les pieds du pylône, mais en ce cas il

sera bon que les rotules et les points d'attache des haubans soient surélevés au-dessus du sol, de 0,50 m à 1 m par exemple, de manière à prévenir l'accrochage possible des haubans.

Ce relèvement des points d'appui pourra s'obtenir, par exemple, en faisant reposer chacune des rotules sur un support étroit formé d'un profilé, U ou I, suffisamment fort, coudé en forme de V renversé (fig. 17) et dont les deux jambes ancrées dans le sol pourront présenter leur plan vertical dans une direction qui, quelconque par rapport à la ligne, sera la plus convenable au point de vue des cultures (fig. 18).

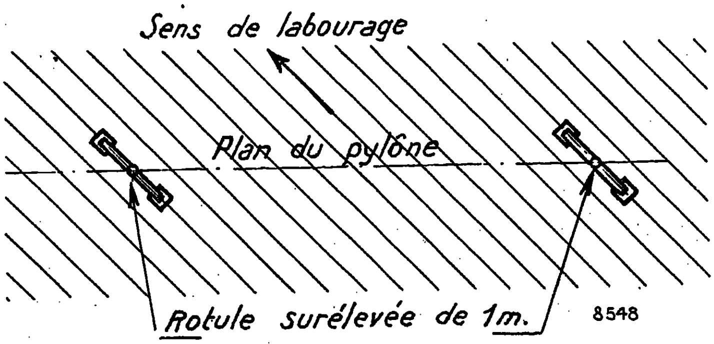


Fig. 18. — Orientation des supports de rotules surélevées dans le sens du labourage.

6°. — *Rupture des conducteurs.*

La pratique usuelle de compter avec une rupture au moins partielle des conducteurs a pour origine l'acceptation d'une éventualité que l'expérience des lignes courantes de toutes sections faisait juger comme inévitable. L'impossibilité de compter à coup sûr sur la tenue de conducteurs de faible section pouvant présenter des défauts locaux, ou incapables de résister à certaines contraintes exceptionnelles, a conduit à borner l'ambition du constructeur à sauvegarder en cas d'accident la partie tout au moins de la construction qui pouvait être plus difficilement remise debout, à savoir les supports.

La considération, dans le cas des pylônes articulés, de l'hypothèse d'un conducteur rompu, bien qu'elle soit encore admissible et comporte un coefficient de sécurité suffisant pour prévenir sûrement la chute des pylônes dans la section entre arrêts, doit être envisagée comme une concession à l'ordre de choses existant et à des habitudes que justifie de moins en moins l'expérience acquise dans ces dernières années avec les conducteurs de forte section.

Il a, en effet, été vérifié que, comme il pouvait être prévu *à priori*, la

sécurité effective d'un fort câble, dont l'homogénéité est nécessairement mieux assurée que celle d'un conducteur plein, est en fait, à sécurité calculée égale, bien supérieure, relativement, à celle offerte par les lignes de faible section, qu'éprouvent davantage proportionnellement les surcharges accidentelles, dynamiques,... etc, et qui sont évidemment plus exposées à présenter des points faibles.

En fait, aucune rupture ne s'est produite à notre connaissance sur les lignes aluminium-acier de plus de 200 mm² qui ont été montées en France au cours de ces dernières années [7]. Les risques de rupture par arc de court-circuit, déjà très limités avec l'âme d'acier, et avec l'emploi de plus en plus généralisé de cornes ou d'anneaux de garde sur les chaînes d'isolateurs, sont destinés à s'atténuer de plus en plus, alors que les exigences des exploitants à l'égard des systèmes de sélection des défauts, en vue du maintien de la stabilité de vastes ensembles interconnectés, se font de plus en plus sévères, et conduisent à des temps totaux de déclenchement, qui, décroissant sans cesse, sont dès à présent, en beaucoup de réseaux modernes, tous inférieurs à la seconde.

Il paraît dès lors justifié d'en venir à une conception plus élevée et plus exigeante de la sécurité, qui, sans faire aucune concession à l'éventualité jugée inévitable d'un accident partiel, prétende, comme pour tout autre type de construction, tel qu'un pont métallique, garantir l'intégrité de l'ouvrage considéré comme un tout, en ce sens que si une partie, telle que les conducteurs, en est connue *à priori* comme plus faible, c'est elle qu'il sera nécessaire et suffisant de renforcer, aux dépens même du reste de la construction, puisque dans un ouvrage rationnellement construit toute marge de sécurité locale excédant celle, seule effective, de la partie la plus faible, doit être considérée comme mal placée, inutile, donc nuisible (fig. 19)[7].

Il est clair que cette notion élargie de la sécurité est non seulement importante au point de vue qui intéresse le contrôle, de la sauvegarde du public, mais encore au point de vue de l'exploitation, en ce qu'elle garantit la continuité de service.

Or, les lignes sur supports articulés se prêtent particulièrement à la faire valoir, puisque l'économie qu'elles procurent permet, sans augmenter le capital total engagé, ou même en se contentant d'un compromis réduisant encore dans une certaine mesure ce total, de ren-

(7) Nous avons notamment eu connaissance d'un cas où un conducteur Al-acier tombé accidentellement au cours du tirage sur une voie ferrée à hauteur des longerons d'une locomotive en marche, a freiné cette dernière et renversé les deux pylônes de traversée encadrant la voie, sans se rompre lui-même.

forcer les conducteurs. Bien que l'augmentation de sécurité réelle ainsi acquise sans débours supplémentaires doive passer au premier plan, il est important de souligner qu'à cet accroissement de section des conducteurs reste attachée, sous forme de diminution des pertes Joule, une rente non négligeable, dont il serait juste de créditer la solution avec conducteurs renforcés, en déduisant le capital correspondant du total à engager (8).

Si toutefois il doit être compté pour quelque temps encore avec l'hypothèse d'un conducteur rompu dans une ligne à 3 conducteurs, ou

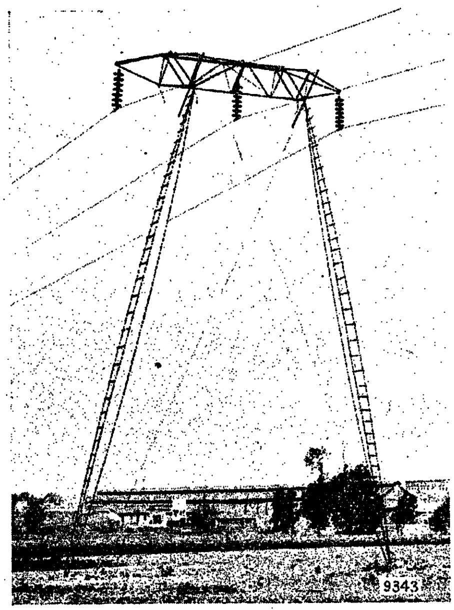


Fig. 19. — Pylône de la ligne d'essai après affaissement accidentel d'un mètre environ d'un des montants.

de deux dans une ligne à 6, le calcul et l'essai que nous avons fait à Aïn-Chenia permettent de compter, même dans le cas le plus défavorable, sur un coefficient de sécurité résiduel encore voisin de 3.

Un autre moyen de plus en plus répandu de limiter la répercussion sur les câbles restants des conséquences d'une rupture partielle, con-

(8) Pour fixer les idées, pour une ligne triphasée à 220 kV, destinée à transporter 100 000 kW avec une utilisation de 3000 h : an, l'économie réalisable par la substitution d'une section de 355 mm² d'Al-acier à celle de 293 mm², représente 21000 kWh par an, valant environ 2000 f, soit pour 500 km, 1 million de francs d'économie par an pour la réduction des pertes en ligne, sans compter l'économie parallèle réalisable dans la compensation à l'arrivée de la chute de tension.

siste à recourir aux pinces à glissement limitant l'effort longitudinal appliqué d'un seul côté de l'attache, ou mieux à des pinces à décrochement du genre de celles décrites dans notre brevet français n° 573 818, et qui, n'entrant en action que pour une inclinaison de la chaîne d'isolateurs dépassant une certaine limite, n'assurent pas moins, comme des pinces fixes ordinaires, la tenue des pylônes dans les conditions normales.

Cette solution, affranchissant presque complètement les traverses de tout moment de flexion dû à la rupture dissymétrique, permet de les établir plus légèrement.

Les conséquences d'une rupture partielle se bornent alors à une chute du conducteur intéressé sur une longueur plus ou moins grande entre arrêts. Le conducteur rompu peut même demeurer encore maintenu à hauteur de fixation si un collier l'embrassant au-dessous de la partie fixe de la pince est prévu pour le retenir après déclenchement.

Conclusion.

En terminant, nous croyons devoir insister sur ce que, si l'idée de supports sans stabilité propre suscite encore chez beaucoup d'ingénieurs une appréhension instinctive, d'ailleurs souvent irraisonnée, le système articulé peut trouver son meilleur argument dans l'affirmation que le coefficient de sécurité qu'il assure est beaucoup mieux défini et garanti que dans le cas des lignes ordinaires.

Cette assurance s'appuie, non seulement sur la conformité beaucoup plus parfaite qu'il réalise des hypothèses du calcul et de la réalité, mais sur la facilité qu'il procure d'essayer rapidement et à peu de frais, les éléments du pylône, sans approximations ni hypothèses simplificatrices, mais dans les conditions mêmes de service. La difficulté de soumettre les pylônes ordinaires avec leurs fondations à de semblables épreuves fait, qu'à part de rares exceptions, elles ne sont presque jamais exécutées, du moins en Europe (9). Parallèlement les contributions successives (par exemple à la conférence des Grands Réseaux), vers une évaluation plus serrée et plus juste des efforts réels dans les ouvrages (calcul des pylônes à la torsion, des consoles aux efforts

(9) Seuls les spécialistes américains de construction de pylônes paraissent disposer d'installations fixes de grande envergure, nécessairement coûteuses, leur permettant d'essayer les pylônes entiers en ateliers, dans les conditions mêmes du calcul (fig. 20).

dynamiques, des conditions de flambage, etc.) constituent autant d'aveux du caractère illusoire et précaire des conditions dans lesquelles sont encore calculées actuellement à beaucoup d'égards les lignes courantes; et il est permis de penser que si le vent de 120 kg : m² qui représente il est vrai une tempête rarissime, se mettait à souffler partout à la fois, peu de lignes en Europe resteraient debout.

La construction articulée trouve par contre dans son principe des titres particuliers à prétendre réaliser une concordance satisfaisante

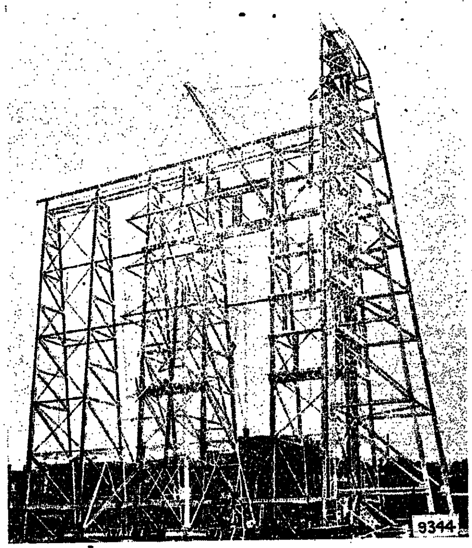


Fig. 20. — Charpente nécessaire pour l'essai des pylones normaux dans les conditions mêmes de service.

entre le coefficient de sécurité réel, celui que l'ingénieur ne doit jamais perdre de vue, et ce coefficient de sécurité purement formel que les nécessités d'une réglementation générale et abstraite conduisent à lui substituer, mais dont notre ignorance, notre défaut de clairvoyance ou notre manque de sincérité, nous amènent trop souvent à nous contenter.

Nous souhaitons donc que cette solution concoure avec d'autres, tendant également à cette adaptation rationnelle et stricte des moyens adoptés au but poursuivi, qui constitue l'art de l'ingénieur, à favoriser le développement de la transmission électrique de l'énergie, à laquelle, comme nous l'avons rappelé au début de cette étude, demeure toujours assuré un bel et large avenir.

LA RÉCUPÉRATION A FLUX VARIABLE (1)

par MM. LANGLOIS-BERTHELOT et LEJEUNE.

Généralités. — Schéma de principe du système. — Schéma des connexions principales. — Réalisation automatique des connexions successives. — Comparaison avec quelques autres schémas. — Analyse algébrique. — Résultats d'exploitation. — Champ d'application du système. — Principe de l'automaticité de la régulation. — Différents modes de réalisation du système J. L.

L'étude de la récupération en traction à courant continu a fait l'objet d'un certain nombre de communications récentes, qui ont rafraîchi un problème déjà ancien. Les avantages à attendre de la récupération et les conditions à réaliser sont parfaitement connues, (en particulier au point de vue assez délicat de la stabilité électrique et mécanique) ; tout a été dit sur la question, aussi bien pour la récupération aux arrêts que pour la récupération en pente.

Différents schémas viables ont été conçus, soit par variation de la tension, soit par variation d'excitation : ces derniers seuls pouvant satisfaire à la condition primordiale d'économie.

Nous estimons cependant qu'il est possible d'apporter encore une contribution intéressante à la question des systèmes à variation d'excitation récemment proposés, en étudiant plus particulièrement la relation entre la conception du schéma et celle de l'appareillage, et les répercussions du système de contrôle sur le fonctionnement des moteurs dans les régimes de transition.

La simplicité et la sécurité du système sont étroitement liées à la simplicité d'appareillage. Il est donc désirable que le schéma possède un automatisme naturel dont on puisse profiter pour réduire le nombre des manœuvres, à partir de la manœuvre initiale déclenchée par le conducteur et qui doit installer l'état de fonctionnement final désiré par une suite d'opérations automatiques. Il est désirable *que les machines auxiliaires éventuelles concourent au but à atteindre* en réagissant spontanément dans les différentes circonstances.

En c nclusion, et bien que nous n'ayons pas en vue ici l'étude

(1) Ce Rapport sera discuté à la Semaine de novembre 1932 de la Société française des Electriciens.

détaillée de l'appareillage, mais seulement l'étude du schéma, nous porterons notre attention particulière sur les points suivants :

a) Automatisme naturel du schéma.

b) Moyens d'installer les différents états de fonctionnement, avec une étude des régimes de transition correspondants.

D'autre part, la condition de stabilité électrique instantanée nous conduira à étudier :

c) Réaction des machines en cas de variations brusques de tension en ligne.

Nous indiquerons quelles sont, à ces trois points de vue, les propriétés du système étudié et réalisé par les Ateliers de Constructions Electriques de Jeumont sous le nom de système J.L.

Notre étude comporte les divisions suivantes :

I. — Schéma de principe du système.

Le dessin animé n° 1 ([2]) indique dans le cas d'un seul moteur de traction, les différents enroulements principaux et d'excitation, et leurs connexions.

Le moteur de traction est excité séparément par une excitatrice à trois enroulements entraînée à vitesse constante, dont l'enroulement d'excitation séparée est alimenté par une excitatrice pilote entraînée à vitesse variable par le moteur de traction.

La note annexe n° 1 indique le principe de cette combinaison, qui réalisé *automatiquement*, dans un intervalle de vitesses déterminé, un fonctionnement du moteur de traction à *vitesse variable et couple constant.*

La note annexe n° 1 indique en outre le mécanisme par lequel l'excitatrice permet d'établir *automatiquement* l'égalité des tensions entre le moteur et le réseau, lors d'une reprise ou du couplage en récupération.

La note annexe n° 1 indique enfin le mécanisme *automatique* par lequel l'excitatrice s'oppose instantanément à toute surintensité dangereuse en cas de variation brusque de la tension du réseau.

([2]) N. B. — *Les six dessins animés ou films annoncés dans le présent texte seront présentés à la semaine de Novembre 1932. Les vues les plus caractéristiques seront reproduites et commentées dans un bulletin ultérieur.*

On voit en conclusion que le schéma adopté, grâce à l'emploi de l'excitatrice, assure *automatiquement :*

1° le fonctionnement à couple constant ;

2° le couplage sur le réseau à toute vitesse ;

3° la stabilité électrique en cas de variations de tension du réseau. Aucun autre système ne possède l'ensemble de ces propriétés.

II. — Schéma des connexions principales.

(Circuits d'induit et circuits d'excitation).

Le dessin animé n° 2 indique, pour le cas habituel de deux moteurs de traction, la suite des connexions à réaliser dans toutes les étapes successives du fonctionnement, tant au démarrage qu'en récupération.

A chaque connexion correspond un fonctionnement dans un certain intervalle de vitesse. Nous avons indiqué, en regard de chaque figure, la variation du courant et du couple moteur, en fonction de la vitesse.

On remarquera que l'automaticité naturelle du schéma n'évite pas la nécessité de recourir à une suite de connexions, dont nous étudierons maintenant la réalisation.

III. — Réalisation automatique des connexions successives.

a) *Principe de la commande J. H. par arbre à cames à commande électrique.*

Le dessin animé n° 3 indique les dispositions principales du système de commande adopté d'une façon générale par les Ateliers de Jeumont pour le contrôle des circuits de traction.

Nous en rappelons ci-dessous les particularités qui le distiguent des équipements similaires :

— Positions d'arrêt de l'arbre à cames absolument rigoureuses. Grande vitesse de fonctionnement, jusqu'à dix (10) crans par seconde.

— Fonctionnement sans aucun choc, à toutes les vitesses.

— Grande puissance de coupure sous un faible encombrement.

— Servo-moteur alimenté par la ligne. Courant de contrôle insignifiant puisé à la ligne jusqu'à 600 V.

— Possibilité de contrôle multiple avec un nombre réduit de fils.

— Possibilité de réalisation de tous schémas par l'arbre à cames

lui-même avec son unique servo-moteur. Les rupteurs de ligne ont été réalisés sous forme de contacteurs fermés par l'arbre à cames comme les autres, mais par l'intermédiaire d'une liaison électromagnétique. Tant que cette liaison est excitée, ils fonctionnent comme des contacteurs ordinaires, mais ils s'ouvrent immédiatement et indépendamment de l'arbre à cames dès que l'excitation cesse. Il suffit en particulier de placer cette excitation sous le contrôle d'un relais à maxima ou à minima pour faire jouer aux rupteurs un rôle de disjoncteur.

De même, l'inverseur du sens de marche est réalisé sous forme d'un tambour actionné par l'arbre à cames.

b) *Commande J. H. appliquée à la récupération.*

Le dessin animé n° 4 indique trois dispositifs particuliers de ce mode de commande appliqués aux équipements à récupération :

— relais plein-flux.

— relais mi-flux.

— relais de couplage.

Nous n'insistons pas sur le détail des circuits auxiliaires et des relais destinés à assurer les protections nécessaires pour parer à toutes les éventualités secondaires (relais à maxima et minima de tension entraînant le retour de l'équipement au zéro, etc...).

Ces détails ne présentent aucun intérêt général ; il est bon toutefois de signaler leur existence, car ils apportent à un schéma très simple dans son principe, quelques apparences de complications inattendues du profane.

IV. — Comparaison avec quelques autres schémas

Le dessin animé n° 5 permet de comparer la stabilité électrique du système J. L. à celle de différents schémas connus. Nous avons indiqué dans chaque cas le schéma et l'oscillogramme correspondant.

V. — Analyse algébrique.

Il est fort simple d'écrire l'ensemble des équations qui représentent le fonctionnement du système, en se limitant aux régimes non saturés.

Mais la discussion est fort compliquée, à cause du grand nombre des paramètres.

En outre, ces équations conduisent à des régimes oscillatoires qu'il est possible d'éviter complètement dans la pratique à l'aide d'amortissements électriques judicieusement choisis.

Nous nous réservons de traiter par la suite cette partie du problème, qui permet seule une prédétermination correcte du dimensionnement des différents enroulements dont la proportion relative paraît à première vue assez arbitraire. Mais il était intéressant de signaler qu'un système théoriquement oscillatoire en apparence, pouvait être utilisé comme système pratiquement stabilisateur.

VI. — Résultats d'exploitation

Le film n° 6 montre la rame d'essais qui a été mise en service et indique les diagrammes du fonctionnement réalisés dans toutes les circonstances normales ou accidentelles qui peuvent se rencontrer.

VII. — Champ d'application du système.

La note annexe n° 2 indique les modalités d'application du système J. L. à la grande traction, aux Chemins de fer Métropolitains et aux tramways.

Conclusion.

Le système J. L. présente différentes particularités des plus intéressantes au point de vue général :

Au premier examen (régimes de variations lentes), le système possède, dans son principe, des propriétés d'automatisme merveilleuses, dont aucun autre système n'approche.

Au second examen (régimes de variations rapides), le système paraît se présenter comme impossible, parce que oscillatoire. Telle est la conclusion de la théorie analytique de première approximation.

Au troisième examen, il devient possible de démontrer que le système est parfaitement correct si l'on amortit convenablement les circuits — et cela sans réduire la rapidité d'action caractéristique du système.

Pour ne pas reproduire ici le détail assez abstrait de ces discussions, nous avons cru devoir transporter la question sur le terrain de la réalité expérimentale. Pour cela, il était nécessaire d'entrer dans les particularités de la réalisation : les dessins animés nous ont permis de mettre ces particularités directement sous vos yeux, et par suite de

vous faire bénéficier en quelques minutes du travail que nos ingénieurs et dessinateurs ont mis quelques mois à élaborer.

Ce procédé d'exposition, qui met toute la réalité en évidence, bien mieux que ne le ferait une visite dans les usines, ou une promenade dans un train d'essai, présente l'avantage de démontrer, non pas que la solution est *possible*, mais que la solution *existe*, toute prête pour ceux qui ont envie de s'en servir. Elle représente une réalité objective — au même titre que toutes les réalités séduisantes qui nous entourent dans le monde industriel.

Note annexe I.

Principe de l'automaticité de la régulation.

L'automaticité de la régulation du courant, tant au démarrage qu'au freinage, repose sur l'emploi d'une excitatrice entraînée à vitesse sen-

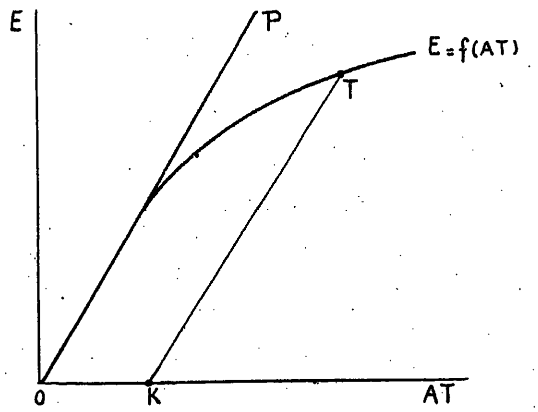


Fig. 1.

siblement constante et alimentant séparément l'inducteur du moteur de traction, dont l'induit est connecté sur la ligne.

Cette excitatrice, tout à fait normale au point de vue induit, est pourvue de trois enroulements d'excitation : shunt, « série », et séparé. (L'enroulement *série* est un enroulement en série avec l'induit du *moteur de traction*, et complètement indépendant du circuit d'induit de l'*excitatrice*).

Soit E = *f* (AT) la caractéristique à vide de la machine, que l'on suppose entraînée à vitesse constante (fig. 1). Réglons l'enroulement shunt de telle façon que sa droite de résistance OP soit parallèle à la

partie droite de la caractéristique à vide de la machine. S'il existe dans l'enroulement séparé un certain régime d'ampères-tours OK, la résultante des ampère-tours shunt et séparés est représentée par la droite KT, obtenue en déplaçant OP d'une quantité à OK.

Les AT de l'enroulement « série » étant supposés antagonistes, portons-les en sens inverse des précédents.

Il faut satisfaire à la relation d'équilibre des ampère-tours :

$$\text{AT sh} + \text{AT sép.} - \text{AT « série »} = \text{AT résultants},$$

lus sur la caractéristique à vide.

On a, par suite du réglage adopté :

$$\text{AT shunt} = \text{AT résultants},$$

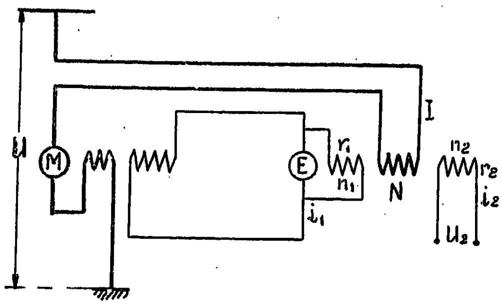


Fig. 2.

car la machine travaille sur la partie non saturée de sa caractéristique.

D'où $$\text{AT sép.} = \text{AT « série »}.$$

Ecrivons les équations des circuits (fig. 2) :

$$U_2 = r_2 i_2$$

$$E = r'(i + i_1) + r_1 i_1$$

$$E = k(n_1 i_1 - NI + n_2 i_2)$$

Il vient :

$$I = \frac{k n_1 i_1 + k \dfrac{n_2 U_2}{r_2} - r'(i + i_1) - r_1 i_1}{kN}.$$

Puisque l'on réalise la relation :

$$r_1 i_1 = k n_1 i_1$$

on obtient :

$$I = \frac{k n_2 \dfrac{U_2}{r_2} - r'(i + i_1)}{kN}. \qquad (1)$$

La machine étant munie d'un enroulement de compensation, nous n'avons pas à tenir compte de la réaction d'induit. En décalant les balais de quelques lames par rapport à la ligne neutre, on arrive à compenser la chute ohmique de l'excitatrice.

L'équation (1) devient donc :

$$I = \frac{kn_2 \frac{U_2}{r_2}}{kN}. \qquad (2)$$

$$NI = n_2 i_2$$

ou encore :

$$\frac{I}{i_2} = \text{constante} \qquad (3)$$

Dans le système J. L. on désire que le moteur de traction fonctionne à couple constant. La puissance électrique est UI ; le couple est proportionnel à $\frac{UI}{V}$ donc à $\frac{I}{V}$, V étant la vitesse.

Alimentons l'enroulement séparé par une excitatrice pilote, à excitation constante et dont la vitesse est proportionnelle à celle du train.

Nous avons à chaque instant :

$$\frac{i_2}{V} = \text{constante}$$

L'équation (3) nous donne alors :

$$\frac{I}{V} = \text{constante} \qquad (4)$$

Cette condition correspond à la constance du couple, comme nous venons de le voir.

D'autre part, écrivons les équations du moteur de traction :

$$U = RI + KN\,\Phi$$

$$U = AN + KN\,\Phi$$

$$\frac{U - AN}{kN} = \Phi. \qquad (5)$$

La valeur du flux, et par suite du courant d'excitation, et de la tension de l'excitatrice à trois enroulements, sont ainsi bien déterminées pour chaque vitesse.

Remarques. — La constance du couple n'est évidemment pas rigoureusement réalisée. Plusieurs facteurs interviennent et qui sont :

1° Le rendement des moteurs. — Celui-ci tombe de 4 à 5 points entre plein flux et mi-flux.

2° La vitesse du groupe n'est pas rigoureusement constante, elle di-

minue avec la charge. Il convient de prévoir un enroulement série concordant pour le moteur d'entraînement du groupe d'excitation.

Ce moteur sera peu saturé afin de rendre la vitesse du groupe sensiblement indépendante des variations de tension en ligne.

Particularités de l'excitatrice à trois enroulements. — L'excitatrice possède les propriétés suivantes :

a) Elle corrige automatiquement l'effet des variations de tension du réseau, aussi bien en moteur qu'en génératrice.

En effet si I vient à augmenter, les AT « série » de l'excitatrice fournis par le courant de ligne deviennent prédominants.

L'équation : $NI = n_2 i_2$ (1), n'est plus satisfaite.

Or, dans la marche en moteur, ces ampère-tours sont magnétisants, la tension E de l'excitatrice augmente, d'où renforcement du flux du moteur et cela jusqu'au moment où l'égalité (1) est rétablie.

En génératrice (le sens du courant étant inverse de celui de la marche en moteur) les AT « série » sont démagnétisants, il en résulte une réduction de la tension E de l'excitatrice d'où réduction du flux de la génératrice, jusqu'à ce que le courant soit revenu à sa valeur primitive

Remarque. — L'excitatrice n'intervenant que lorsque le courant a déjà varié, il convient de laisser, sur les électros du moteur de traction, quelques spires constamment en série avec l'induit, afin d'atténuer la pointe initiale instantanée.

b) Elle se prête au couplage série-parallèle dans le cas de deux moteurs, et ceci à l'aide d'une disposition d'appareillage très simple.

Rappelons d'abord que le couplage série-parallèle de deux moteurs de traction, qui permet d'alimenter les moteurs aux basses vitesses sous la tension moitié de la tension de ligne, représente une combinaison incontestablement avantageuse dont il n'est possible de se passer qu'au détriment de la bonne utilisation des moteurs de traction. Cette vérité, qui fut d'abord contestée dans la presse technique pour les systèmes de démarrage à flux variable, ne fait plus de doute à l'heure actuelle.

Dans le cas d'un système de réglage de vitesse par désexcitation, la difficulté, fondamentale à l'emploi du système série-parallèle, est que, par suite du fonctionnement à couple constant, les moteurs doivent passer du fonctionnement mi-flux et deux fois le courant de démarrage en couplage série au fonctionnement plein flux et courant de démarrage en couplage parallèle. La variation rapide de demi-flux à plein flux

doit donc être réalisée dans les moteurs de traction. Ce résultat est obtenu en réduisant de moitié le courant dans l'enroulement séparé, par insertion d'une résistance.

Il apparaît alors un régime variable pendant lequel le courant de ligne n'ayant pas encore varié, les ampère-tours « série » deviennent prédominants.

Ces ampère-tours étant magnétisants, l'excitatrice montera donc en tension jusqu'à ce que l'égalité $NI = n_2 i_2$ soit à nouveau satisfaite.

Nous revenons donc au cas précédent.

Remarque. — Afin de parer aux écarts pouvant exister entre différents moteurs (circuit magnétique) il convient de prévoir une exci-

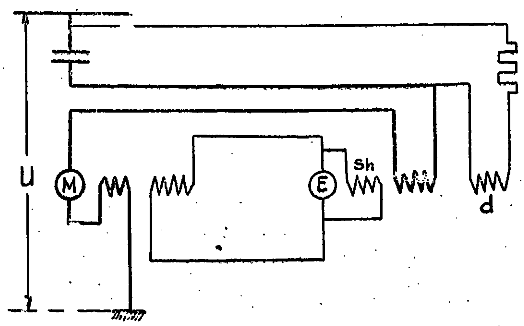


Fig. 3.

tatrice à trois enroulements par moteur. Les couplages des excitatrices sont identiques à ceux des moteurs.

c) Elle permet le couplage du moteur principal sur le réseau, c'est-à-dire la reprise après une course sur l'erre, tant en marche qu'en récupération — et ceci à l'aide d'une disposition d'appareillage extrêmement simple indiquée par le schéma fig. 3.

L'enroulement séparé *d* est déconnecté de l'excitatrice pilote et se trouve branché aux bornes du rupteur de ligne ouvert lors de la course sur l'erre. Le courant de traction étant nul, $NI = 0$, l'équilibre de l'excitatrice ne peut être assuré que lorsque $n_2 i_2$ est également nul. Tant que la tension aux bornes de l'interrupteur principal n'est pas nulle, il passe dans l'enroulement séparé un courant i_2 qui fait monter l'excitatrice en tension, d'où accroissement du flux des moteurs de traction. Lorsque $i_2 = 0$ (différence de potentiel nulle aux bornes

du rupteur de ligne) le couplage est possible ; il est déterminé par un relais à minima de tension.

On voit que, automatiquement, la tension du moteur principal se fixe à une valeur égale et opposée à la tension du réseau.

Note Annexe 2.

DIFFÉRENTS MODES DE RÉALISATION DU SYSTÈME J. L.

Le système J. L. présente comme caractéristique fondamentale la propriété de maintenir un couple constant tant pendant le démarrage que pendant le freinage.

La valeur constante de ce couple peut être réglée en disposant une résistance fixe dans le circuit de l'excitatrice pilote. La conduite d'un véhicule en opposant l'un à l'autre un couple résistant et un couple moteur sensiblement constants, ne convient pas en général pour la grande traction où l'on désire maintenir une vitesse constante sur un parcours exempt d'obstacles : la vitesse ne peut se stabiliser, et il est nécessaire de couper le courant lorsque le maximum de la vitesse est atteint.

Différentes modifications du système J. L. permettent de fixer le fonctionnement sur une caractéristique naturelle :

1er *moyen.* — L'excitation du moteur de traction est prévue avec un enroulement série et un enroulement séparé alimenté par l'excitatrice pilote à trois enroulements, les ampère-tours de ces deux enroulements étant sensiblement d'égale importance pendant le démarrage.

Une fois le démarrage terminé, on ouvre le circuit d'excitation séparée du moteur de traction, qui fonctionne alors sur sa caractéristique naturelle en moteur série ordinaire shunté de 50 pour cent.

2e *moyen.* — L'excitation du moteur de traction est entièrement séparée comme dans le système J. L. simple (avec cependant les quelques spires série stabilisatrices comme expliqué).

Mais lorsqu'à un instant quelconque du démarrage on désire fixer la vitesse, l'enroulement d'excitation séparée, au lieu d'être alimenté par un courant proportionnel à la vitesse, est alimenté par un courant de la forme :

$$A - BN,$$

A et B étant des constantes.

Cette condition sera réalisée en alimentant l'enroulement séparé par la différence entre une tension constante et la tension de l'excitatrice d'essieu.

Les caractéristiques naturelles vitesse-courant ainsi réalisées sont inclinées sur l'horizontale comme l'exige la condition de stabilité mécanique ; inclinaison facilement ajustable par résistances de réglage.

Sur une même caractéristique on passera de la marche en moteur à la marche en génératrice à vitesse peu différente, lorsque la pente sera suffisante pour permettre la récupération.

Avec le premier moyen indiqué, l'excitatrice est mise hors service en fin de démarrage. Avec le second moyen, elle doit au contraire rester constamment en service. Mais toutes les vitesses intermédiaires sont réalisables; il est possible sans complication d'appareillage de réaliser un grand nombre de crans de vitesse économique.

Il résulte de ces remarques que le premier moyen convient pour les automotrices en service sur parcours à stations rapprochées (Chemins de fer métropolitains) — tandis que le second système convient pour la grande traction — et en particulier pour les trains devant faire à la fois le service des marchandises et celui des voyageurs.

Le moteur série, considéré jusqu'ici comme intangible pour la grande traction, trouve un concurrent redoutable dans cette forme de réalisation du système J. L.

GRANDEURS FONDAMENTALES, ÉQUATIONS DE DIMENSIONS ET SYSTÈMES D'UNITÉS (1)

par M. J. LOISEAU

Ancien Elève de l'Ecole Polytechnique.

La présente note a pour but de montrer que les systèmes d'unités électro-magnétiques et électrostatiques C G.S comportent, en réalité, quatre unités fondamentales et de déterminer les conditions rationnelles auxquelles doivent satisfaire des unités fondamentales. Ces conditions ne sont remplies par aucun des deux systèmes C G S.

Le problème présente alors deux solutions : soit conserver une quatrième grandeur fondamentale, qui ne peut être que la charge électrique, soit n'utiliser que trois grandeurs fondamentales en reliant la masse gravifique à la charge électrique.

La combinaison des lois de Coulomb et de Newton donne cette possibilité.

I. — GRANDEURS ET UNITÉS.

MAXWELL, dès les premières lignes de son traité d'Electricité et de Magnétisme » s'exprime ainsi :

« L'expression de toute quantité se compose de deux facteurs ou éléments. L'un d'eux est le nom d'une certaine quantité bien connue qui est de même espèce que la quantité à exprimer et que l'on choisit pour étalon de mesure. L'autre élément est le nombre de fois qu'il faut prendre l'étalon pour reproduire la quantité voulue ».

II. — LOIS

Exprimer une loi au moyen de signes algébriques, c'est écrire des formules algébriques exprimant des relations entre les symboles de ces grandeurs, qui soient valables quelles que soient les unités des grandeurs que représentent ces symboles.

Si a, b, c,.. f. sont les valeurs numériques de certaines grandeurs, si A, B... F. sont les symboles des grandeurs, et si $\alpha, \beta, \gamma, \ldots \varphi$ sont les unités correspondantes, $f(a, b, c, \ldots f) = 0$ exprimera une relation

(1) Ce Rapport sera discuté à la séance de discussions de novembre 1932, de la Société française des électriciens.

entre les grandeurs si $f\left(\frac{A}{\alpha}, \frac{B}{\beta}, \ldots \frac{F}{\varphi}\right) = 0$ quelles que soient α, β ... φ, autrement dit : *une loi s'exprime toujours par des expressions homogènes par rapport à chacune des grandeurs qui interviennent.*

III. — Systèmes de représentation.

Pour qu'une loi puisse être exprimée, il faut tout d'abord préciser le système de référence.

Ce système est purement *rationnel, idéal.*

Il est constitué le plus souvent :

a) d'une figure géométrique fixe; deux axes rectangulaires, un trièdre de coordonnées de l'espace à 3 dimensions, etc.. Ce système géométrique est purement conventionnel : à chaque convention s'associe un système géométrique de grandeurs géométriques. C'est ainsi que l'on peut prendre dans le plan euclidien un système d'axes rectangulaires, ou un système polaire, un système de coordonnées elliptiques, etc... On peut encore utiliser un plan non euclidien, par exemple projectif. Les lois obtenues dans des systèmes de ce dernier genre seraient très différentes de celles que nous utilisons, car il n'est pas possible d'y définir les même grandeurs que dans le plan euclidien : un arc du plan projectif n'a aucun rapport avec un arc du plan euclidien, mais dans l'un et l'autre cas, c'est cependant une grandeur conservée par une quelconque des transformations permises par la géométrie correspondante.

b) d'un système de nombres-repères, qui permet de définir la simultanéité de deux phénomènes et de définir la notion d'instant et de durée. Ce système de nombres constitue des repères purement locaux.

Remarquons toutefois que pour la terre, l'unité de temps adoptée est la même en tous ses points, puisqu'elle est définie par la rotation même de la terre *supposée rigide*. Pour subdiviser cette unité, on emploie ensuite des appareils périodiques ou supposés tels : oscillation lumineuse, pendule, etc..,

Ce système de repères locaux est purement conventionnel.

c) d'un certain nombre de corps étalons qui permettent de comparer des *masses*.

La notion de masse, contrairement aux notions précédentes, (repère géométrique et repère dans le temps) contient quelque chose qui est en dehors de nous-mêmes, c'est qu'en effet l'équilibre, c'est-à-dire

l'immobilité d'une balance est un phénomène indépendant de nos conventions et même de nos instruments.

Il y a donc une différence essentielle entre les unités de temps et de longueur, ou même entre les unités de temps, les unités géométriques et celle de masse.

Bien entendu, la définition même de l'unité qui sert à exprimer cette notion que nous traduisons par la « masse » a, aussi bien que les autres, un contenu conventionnel, c'est à-dire qu'on pourrait, pour introduire cette notion, prendre tout autre chose que la masse mécanique qui intervient dans nos formules : les formules seraient simplement modifiées. Au lieu d'écrire $F = m \frac{d^2x}{dt^2}$ avec m indépendant de x et de t, ce qui est la convention de définition de la masse, on peut écrire $F = \varphi(m_1, x', t, x'')$; c'est ainsi qu'opère la théorie de la relativité. Mais alors m_1 et m n'ont plus de commum que le nom, qui malheureusement, a été conservé dans le cas de la relativité, parce que $m = m_1$ lorsque $x' = 0$.

Toute autre formule que $F = m \frac{d^2x}{dt^2}$ peut être utilisée pour la définition de cette notion intrinsèque de la matière qui exprime, en somme, qu'il y a dans la nature quelque chose de plus que nos conventions.

D'une façon raccourcie, on peut dire que l'espace n'existe que dans notre imagination et que la masse est en dehors de nous.

IV. — Unités de dimensions.

Les grandeurs géométriques, la masse et le temps, permettent de définir les unités et de décrire une partie des phénomènes qui nous entourent. Nous dirons que ces phénomènes existent dans « le groupe de la mécanique rationnelle » qui, si l'on veut, peut se définir par un invariant intégral (2).

Dans ce groupe toutes les lois s'expriment au moyen de relations entre des longueurs, des masses et des temps.

Si $f(a.b, \ldots . f) = 0$ est une de ces lois, on en tire

$$\frac{A}{\alpha} = \psi\left(\frac{B}{\beta} \ldots\ldots \frac{E}{\varphi}\right).$$

Si donc, on change les unités de masse, de temps et de longueur,

(2) Voir E. Cartan. Leçons sur les invariants intégraux.

$\alpha, \beta \ldots \varphi$ changent et, comme la relation est homogène, il en résulte que l'expression qui exprime comment varie $\frac{A}{\alpha}$, c'est-à-dire α, lorsqu'on fait varier les unités de longueur masse et temps est de la forme : $L^p M^q T^r$; p, q, r étant trois nombres définis pour chaque unité.

L'expression $L^p M^q T^r$ est appelée *équation de dimensions* de l'unité.

V. — Nombre des unités fondamentales.

Les unités de *longueur*, *masse* et *temps* suffisent-elles à définir toutes les grandeurs, une fois le système repère choisi, système qui est habituellement celui de la géométrie euclidienne à 3 dimensions?

a) toutes les grandeurs purement géométriques ne peuvent découler que de la métrique de la droite, par conséquent toutes les unités géométriques que l'on pourra définir ne dépendront que de l'unité de longueur.

b) Si l'on considère un phénomène réel, le décrire pour le physicien et le technicien, c'est indiquer à chaque instant, par rapport au repère géométrique choisi, (l'espace euclidien à 3 dimensions), la position de tous les points qui le constituent.

Les trois grandeurs L, M, T et leurs unités devraient donc suffire.

Elles *suffisent certainement si tout se réduit au mouvement d'une masse.*

Si, dans la suite de nos expériences, nous constatons que certains phénomènes ne peuvent se représenter dans le système euclidien choisi en fonction de la masse et du temps, nous aurons comme ressources, pour atteindre notre but :

1° soit de supposer des mouvements cachés de certaines masses. Dans ce cas, toute la représentation est maintenue, mais l'expérience interviendra et pourra infirmer notre hypothèse.

2° soit d'ajouter, à côté de la massse, *n* autres grandeurs supposées indépendantes de nos conventions géométriques, mais alors il faudra démontrer que ces grandeurs ne dépendent d'aucune grandeur géométrique, ni de la masse, ni du temps.

3° soit de modifier nos conventions en ajoutant une ou plusieurs dimensions à notre système représentatif, c'est-à-dire nous placer dans un espace à 4,.... *m* dimensions. Il ne suffira pas de modifier notre système de représentation en changeant de système sans changer le nombre de dimensions, par exemple, en passant du système euclidien

au système projectif ou affine, car il existe une transformation permettant de ramener l'un des systèmes à l'autre, l'emploi d'un de ces systèmes pourra être plus commode, mais n'ajoutera rien à l'emploi de l'un des autres ; il permettra cependant peut-être de découvrir certaines lois en raison de la simplicité de leur expression dans ce système.

Ajouter une ou plusieurs dimensions permet d'envisager comme en 1°) de nouveaux mouvements cachés suivant la (ou les) dimensions supplémentaires et c'est pourquoi ce procédé peut réussir.

VI. — Un système a trois dimensions et a trois unités fondamentales est insuffisant

Dans l'état actuel de nos connaissances, nous savons que l'emploi, dans le système euclidien à 3 dimensions, des notions de masse, temps et longueur ne suffit pas à décrire les phénomènes observés. Il faut d'autres grandeurs pour représenter les phénomènes électromagnétiques. Initialement, la description de ces phénomènes a nécessité l'emploi de 5 unités fondamentales: longueur, masse, temps, masse magnétique et charge électrique. L'expérience a permis de ramener ces deux dernières notions à une seule d'entre elles, par exemple la masse électrique, en supposant que, dans tous les cas, un mouvement « caché » de masses électriques permet de représenter les champs magnétiques.

Mais cela est encore insuffisant pour représenter tous les phénomènes et c'est la raison pour laquelle a été proposé l'emploi du système de la relativité dans « l'espace-temps », système dans lequel le temps est assimilé à une grandeur spatiale. Cette tentative conduit à modifier complètement les lois de la mécanique classique (3). Les procédés *a* et *b*, et l'emploi de 4 grandeurs sont à rejeter. On peut alors essayer l'emploi d'une cinquième grandeur fondamentale. C'est en fait ce que l'on fait lorsqu'on introduit certaines notions nouvelles telles que la probabilité de présence.

c) On peut essayer plus simplement de représenter la nature dans un système euclidien à 4 dimensions. Ce procédé a le grand avantage de n'introduire aucune incompatibilité entre les résultats obtenus antérieurement et de nouveaux résultats découlant de cette représen-

(3) On se trouve donc dans la même situation que le géomètre qui décrit une sphère dans le système cartésien à axes rectangulaires et dans un système paramétrique (méridien et parallèle). Aucune propriété de la sphère n'est changée.

tation C'est qu'un tel système est un *prolongement* du système euclidien à 3 dimensions *qu'il contient tout entier*.

Si même ultérieurement on constate que la géométrie euclidienne à 4 dimensions est insuffisante, *sans changer aucune définition*, on pourra envisager un système de représentation à 5 dimensions qui contiendra le précédent, etc. C'est un procédé qui apparait comme ayant une grande souplesse, car il ne fait jamais table rase de ce qui a été précédemment établi (4). L'emploi de l'espace euclidien à 4 dimensions conduit à n'utiliser que *3 grandeurs fondamentales* : masse, temps, longueur. La charge de l'électron devient alors une notion dérivée : elle se réduit au mouvement d'une masse dans lequel intervient la 4e dimension d'espace. La masse magnétique est également l'expression d'un mouvement particulier de la charge électrique.

En résumé, si l'on utilise un espace à 4 dimensions (d'espace), 3 unités fondamentales seulement sont nécessaires pour représenter les lois de la mécanique et de l'électromagnétisme.

VII. — Notion d'invariance.

Si l'on peut choisir de façons très diverses les grandeurs qui permettent de représenter les phénomènes, elles ne peuvent être choisies d'une façon complètement arbitraire, car les équations qui représentent des lois sont les *invariants* d'un groupe.

Cela se précise en disant que si l'on se fixe un système géométrique défini lui-même, comme tous les systèmes géométriques, par un groupe de transformation : le groupe des déplacements pour la géométrie euclidienne, le groupe projectif en géométrie projective, le groupe des affinités pour la géométrie affine, etc.., un phénomène est représenté par une relation invariante pour les transformations du groupe.

Une loi s'exprime, en général, par une relation telle que ; $\omega(\xi, d\xi) = 0$, ω étant une expression différentielle invariante par les transformations du groupe, c'est-à-dire que par une transformation du groupe $\omega(\xi, d\xi)$ devient $\varpi(\eta, d\eta)$ et qu'en fonction des nouvelles variables η $d\eta$ on a : $\varpi(\eta, d\eta) = \omega(\xi d\xi)$.

Ces relations ne dépendent pas du repère utilisé dans le groupe considéré.

(4) L'emploi d'un espace euclidien à 4 dimensions paraît donner d'excellents résultats en l'état actuel de nos connaissances.

VIII. — Grandeurs électromagnétiques.

La géométrie en usage étant la géométrie euclidienne à 3 dimensions, le temps est défini au moyen de la rotation de la terre et la masse par comparaison à un étalon arbitraire. Dans ces conditions, les lois des phénomènes électriques et magnétiques permettent de définir des grandeurs dérivées suivant le tableau ci-dessous :

Loi de Coulomb

$$\mathcal{F} = g\,\frac{ee'}{r^2} \qquad\qquad \mathcal{F} = gm^2L^{-2},$$

Loi de Coulomb magnétique

$$\mathcal{F} = h\,\frac{m_1m_1}{r^2} \qquad\qquad \mathcal{F} = hm_1^2L^{-2},$$

Loi de Biot et Savart

$$\mathcal{F} = K_3\,\frac{m_1 I ds \sin\alpha}{r^2} \qquad\qquad \mathcal{F} = K_3 m_1 I L^{-1},$$

Formule d'Ampère

$$\mathcal{F} = K_4\,\frac{II'dsds'}{r^2}(2\cos\varepsilon - 3\cos\theta\cos\theta') \qquad\qquad = K_4 I^2,$$

Loi de Joule

$$\mathcal{E} = K_5 RI^2 t \qquad\qquad \mathcal{F}L = k_5 I^2 RT,$$

Loi de Joule et Ohm

$$\mathcal{E} = K_6 EIt \qquad\qquad \mathcal{F}L = K_6 EIT,$$

Loi d'Ampère

$$I = K_7 U \qquad\qquad I = K_7 M L^{-1},$$

Intensité de courant et quantité d'électricité

$$M = K_8 It \qquad\qquad M = K_8 IT,$$

Loi de l'induction

$$V = K_9\,\frac{\partial\varphi}{\partial t} \qquad\qquad V = K_9 m_1 T^{-1}.$$

Les 9 équations de dimensions existent entre 5 grandeurs électriques m, m_1, I, R, E. En les éliminant, il reste 4 équations en L M T et les coefficients auxquels ces derniers devront satisfaire. Ces équations sont :

$$h = K_3K_7 \qquad K_3 = K_4 = K_6K_9 \qquad gK_4^{-1}K_8^2 = L^2T^{-2}.$$

Mais si l'on veut que Ki^2t, Eit et Em représentent de l'énergie mécanique, ce qui exprime une liaison particulière entre les équations du groupe de la mécanique et celui des grandeurs électromagnétiques, on peut écrire alors $K_5 = K_6 = K_8 = 1$, ces coefficients étant de dimensions nulles.

Les équations deviennent :

$$h = K_3 K_7 \qquad K_3 = K_4 = K_9 \frac{g}{K_4} = L^2 T^{-2}.$$

Or l'expérience montre que $\frac{g}{K_4}$ est bien déterminé et égal au carré de la vitesse de la lumière dès que les unités de longueur, masse et temps ont été déterminées.

Il en résulte :

$$K_4 = \frac{g}{c^2} = K_3 = K_9,$$

$$h = \frac{g}{c^2} K_7.$$

Si l'on *admet* l'identité des champs électriques produits par un courant ou par un feuillet, ce que l'expérience indique, K_7 est de dimension nulle et en posant $K_7 = 1$ on définit l'unité de puissance du feuillet en fonction de l'unité de courant.

Il reste $\qquad K_4 = \frac{g}{c^2} = K_3 = K_9 \qquad h = \frac{g}{c^2}.$

IX. — Systèmes EM et ES et autres systèmes

Si l'on fait $g = 1$ on obtient le système d'unités électrostatique ; $h = 1$ donne le système électromagnétique.

Le tableau I indique les équations de dimension des unités électriques et magnétiques les plus importantes dans les systèmes CGS, ES et EM. Il comprend également les équations de dimensions de la constante de gravitation universelle, et de la constante de Planck ramenée à l'unité de volume.

X. — Grandeurs de dimensions nulles.

Une grandeur est de dimensions nulles par rapport aux unités de longueur, de temps, de masse, lorsque sa valeur numérique n'est pas changée par une modification des unités de longueur, masse, temps.

Trois cas peuvent se produire :

a) *La grandeur est une grandeur fondamentale.* — Dans ce cas, tout phénomène où intervient la grandeur ne peut être décrit que si l'on se donne une équation entre les unités de longueur, de masse, de temps et celle de la grandeur considérée.

b) *La grandeur est purement géométrique.* — Elle s'exprime par le

rapport de deux longueurs. Ces séries de grandeurs sont purement conventionnelles. Elles n'ont pas d'existence *intrinsèque*. Elles ne dépendent pas de la nature des choses. On peut en définir de cette sorte autant qu'on le veut, elles n'existent que par définition.

Exemples :

α) 1er exemple. — Une unité de longueur étant définie, considérons (fig. 1) un cercle de centre O et de rayon r et un cercle concentrique de

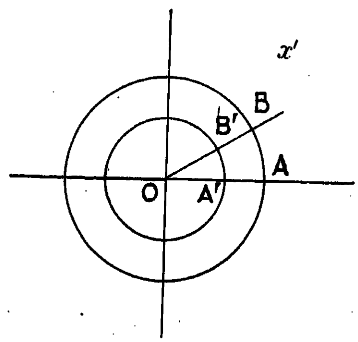


Fig. 1.

rayon 1, puis deux rayons OA et OB rencontrant le cercle de rayon 1 en A' et B'.

On appelle angle la quantité $\frac{A'B'}{OA'} = \theta$.

On a $$\frac{AB}{OA} = \frac{A'B'}{OA'} = \theta,$$

$\frac{AB}{OA}$ est donc un invariant lorsque B parcourt le rayon OB'. Se donner $\frac{AB}{OA}$ définit un lieu OBx' de points B. θ *est sans dimension*. Se donner θ équivaut à se donner B' et par conséquent OB. On pourra définir une unité d'angle. L'angle correspondra à $\frac{A'B'}{OA'} = \theta$.
θ étant un nombre choisi arbitrairement.

2° *exemple*. — Considérons (fig. 2) des coordonnées elliptiques dans le plan : soient E_1 les coniques homofocales définies par l'équation $\frac{x^2}{a' - s} + \frac{y^2}{b' - s} = 1$. On sait que par un point M du plan, il passe deux de ces coniques et qu'elles y sont rectangulaires. L'une est une ellipse et l'autre une hyperbole. Soit E_0 l'ellipse correspondant à $s = 0$. Soit M un point du plan, et λ, μ, les valeurs de s qui corres-

pondent à ce point. Lorsque M se déplace sur l'hyperbole H, le paramètre μ ne varie pas. Cette hyperbole est donc définie, si l'on veut, par le point M' où elle rencontre une ellipse fixe, par exemple E_0. Elle sera définie par l'arc $A'M' = s'_\mu$. On a donc $s'_\mu = Cte$ lorsque M se déplace sur l'hyperbole H, on peut donc prendre $\frac{A'M'}{OA'}$ comme pseudo-angle et le définir comme on a défini un angle. On aura $U = f(M\ A)$, U est de dimensions nulles par rapport à la seule unité intéressant la géométrie. Dans le cas de l'angle, on se donne le cercle de base. Il est défini par son rayon unité ; dans le cas des coordonnées elliptiques, on se donne deux grandeurs, la distance focale et le grand axe. Mais le

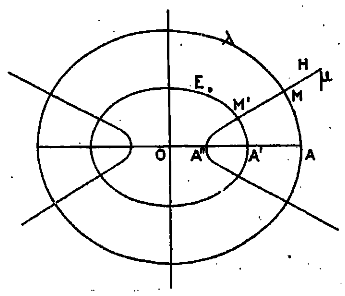


Fig. 2.

résultat est le même. Ces deux exemples montrent que, si l'on reste dans le domaine de la géométrie, domaine purement conventionnel, on peut définir autant de grandeurs qu'on le désire ; mais on peut aussi bien ne pas les définir.

c) Considérons le cas général et prenons un exemple :

Soient une dynamo, E la différence de potentiel aux bornes, Φ le flux des inducteurs, N le nombre de tours que fait l'induit par seconde, ν le nombre de conducteurs situés sur l'induit. On a :

$E = \lambda a \nu N \Phi$; λ peut être choisi arbitrairement. Cela définit l'unité de différence de potentiel. Prenons ce coefficient égal à 1.

On tire de l'équation précédente :

$$\nu = \frac{E}{aN\Phi}$$

ν est sans dimensions : *c'est un nombre*.

Si l'on fait varier le flux ou N, ce nombre ne varie pas : il existe une relation bien déterminée entre E et Φ.

Supposons que nous ne sachions pas comment est faite une dynamo et qu'on nous en apporte plusieurs à essayer. Nous constaterons

que $\frac{E}{aN\Phi}$ est sans dimension : nous aurions beau changer les unités de longueur, masse et temps, ν sera un nombre *fixe* pour chaque dynamo : nous pourrions cataloguer toutes les dynamos en nous servant de ce nombre que nous pourrions appeler nombre de « conducteurs ». Ce serait la définition d'une grandeur spéciale et fondamentale.

Ces dynamos seraient caractérisées par le fait que si nous voulons modifier E, Φ, N, a, par un procédé quelconque, $\frac{E}{aN\Phi}$ resterait invariant autrement dit :

$$d\left(\frac{E}{aN\Phi}\right) = 0.$$

Nous en conclurions bien qu'il existe une relation entre E, N, Φ, a et que $\frac{E}{aN\Phi}$ est une quantité fondamentale, aussi fondamentale que la masse, la longueur et le temps, ou bien que ν est le rapport de deux temps, de deux longueurs ou de deux masses et qu'elle pourrait être supprimée par la considération des deux termes du rapport.

Les deux systèmes EM et ES conduisent bien à employer 4 unités fondamentales, mais le choix de la 4ᵉ est purement conventionnel, car ce n'est la considération d'aucune loi déterminée qui conduit à écrire que le coefficient d'induction électrostatique ou la perméabilité sont des invariants.

En effet, dans le système électrostatique :

$$\mathcal{F} = \frac{ee'}{\varepsilon r^2}.$$

donc

$$\varepsilon = \frac{ee'}{\mathcal{F} r^2}.$$

Cela signifie, puisque ε est, par définition, sans dimension par rapport à L, M, T, que si l'on modifie d'une façon quelconque e ou r, ε ne varie pas. Or, en fait, la notion de coefficient d'induction est une notion attachée à un milieu et, si l'on fait varier par exemple la pression, ε varie.

Conclusion : Le pouvoir inducteur invariant est inacceptable, autrement dit, l'unité de pouvoir inducteur spécifique n'est pas *une unité fondamentale*, car elle n'est pas indépendante de l'unité de masse ou de longueur.

XI. — Choix d'une 4ᵉ grandeur

Quelle autre grandeur peut-on prendre comme fondamentale. Ce choix est évidemment très limité.

On ne voit guère que *la charge électrique* qui puisse être considérée comme invariante par rapport à L, M, T.

En adoptant la charge électrique pour 4[e] grandeur fondamentale, on obtient comme équations de dimensions, celles de la colonne 4 du tableau I. Cet emploi suppose la charge électrique invariante sous toutes les actions dues aux masses, aux charges électriques et à leurs mouvements. Supposer la charge électrique invariante n'a rien de contradictoire avec les autres définitions. Cette hypothèse pourrait permettre de *définir* ce qu'on entend par charge électrique de façon logique et précise.

XII. — Emploi de la géométrie à 4 dimensions.

L'autre attitude que l'on peut adopter vis-à-vis des différents systèmes d'unités est celle à laquelle on est conduit en envisageant la représentation des phénomènes dans l'espace à 4 dimensions. On peut alors n'admettre que 3 unités fondamentales seulement : la masse, la longueur et le temps.

Le système d'unités électromagnétiques se définit, soit par la détermination d'une relation entre la charge électrique ou une unité dérivée du système électrostatique, la masse gravifique et le temps soit, sans faire d'hypothèse sur les relations entre les grandeurs, par le choix *arbitraire* d'une relation entre les grandeurs L, M, T, et la charge électrique. Le système d'unités résultant de la convention sera aussi valable que le système E. S. ou E. M., à condition qu'une expérience précise permette de déterminer l'unité de charge électrique ou une unité dérivée quelconque.

Un avantage de ce nouveau système sera de faire *disparaître une unité fondamentale*.

A vrai dire, la relation de dimensions entre la charge électrique, la masse, la longueur et le temps doit, pour être acceptable, satisfaire à certaines conditions, mais on peut s'aider de la théorie pour la déterminer. La mécanique de l'espace euclidien à 4 dimensions conduit à donner à la charge électrique et à la masse une *même équation de dimensions*.

XIII. — Système absolu.

Il est facile de donner, dans ces conditions, une définition de l'unité de *charge électrique* qui conduise à un résultat satisfaisant permettant de préciser une expérience pour la définir réellement.

Considérons la loi d'attraction universelle dans le vide, $F = f\frac{MM'}{r^2}$ et celle des répulsions électrostatiques, $F = g\frac{mm'}{r^2}$ dans le vide.

On peut *charger électriquement deux masses égales M de sorte que l'attraction* gravifique dans le vide compense la répulsion électrostatique à *toute distance*.

Or on ne peut admettre que l'une ou l'autre de ces forces puisse *provenir d'actions qui se transmettraient sans intermédiaire*.

Même NEWTON n'accepterait pas cette idée et il ne considérerait la loi de gravitation que comme un résultat global; l'action issue d'une masse reçue par une autre masse ayant son siège dans l'espace; il admettait nettement que la loi de gravitation n'était que l'expression finale de l'effet d'un mécanisme inconnu dont le siège est dans le milieu. Il est naturel également de penser que ce milieu est le siège des phénomènes électromagnétiques.

Dans un autre milieu que le vide, l'unité de charge étant fixée, on a :

$$\mathcal{F}_{gravifique} = f\varphi\frac{MM'}{r^2}, \qquad \mathcal{F}_e = \frac{g}{\varepsilon}\psi\frac{mm'}{r^2},$$

ε ne dépendant que du milieu et φ, ψ, dépendant de la nature de la matière attirée.

Dans le vide, φ et ψ sont égaux à 1.

Dans un milieu de densité ρ_0, pour une masse de densité ρ et deux masses égales, on a :

$$\mathcal{F}_{gr.} = f\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)^2 \frac{M^2}{r^2},$$

$$\mathcal{F}_e = f\psi(\rho - \rho_0)^2 \frac{V^2}{r^2},$$

car la densité cubique de l'électricité est sa densité apparente dans l'éther (5), V étant le volume considéré.

Si l'on écrit l'égalité dans le cas général, on a

$$f\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)^2 \frac{V^2\rho^2}{r^2} = f\psi\frac{(\rho - \rho_0)^2}{r^2} V^2,$$

d'où

$$\psi = 1.$$

Il en résulte que :

$$\mathcal{F}_{gr.} = f\left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right)\frac{MM'}{r^2} \qquad \text{et} \qquad \mathcal{F}_e = \frac{g}{\varepsilon}\frac{mm'}{r^2},$$

(5) Cela découle des équations de Maxwell.

pour l'éther $\rho = \rho_0 \quad \mathcal{F}_{gr.} = 0$ et $m = 0$. C'est bien ce que l'expérience indique : *deux masses de densité égales à celles de l'éther n'ont pas d'action gravifique l'une sur l'autre.*

L'unité de charge dans ces conditions devient égale à

$$\frac{1^{ES}}{\sqrt{f}} = \sqrt{\frac{5}{3}}\ 10^{-6}\ \text{Coulomb} = 1{,}291.10^{-6}\ \text{Coulomb.}$$

Cette expérience faite avec 2 masses égales à l'unité définit une unité de charge électrique.

Avec cette unité de charge, la loi de Coulomb s'écrit dans le vide :

$$\mathcal{F}_e = f\,\frac{mm'}{r^2},$$

m aura même dimension que la masse gravifique. Il est bien évident que l'unité de charge ainsi définie n'est pas arbitraire et que par conséquent le procédé est satisfaisant.

Le système des équations de dimensions qui découle de la définition de l'unité de charge figure au tableau I ; il présente certains avantages.

1° Aucune unité n'a de dimensions nulles. (Sinon une 4ᵉ grandeur fondamentale devrait être choisie).

2° Le champ électrique devient une *accélération* (6).

3° Le champ d'induction a pour équation de dimension T^{-1}, c'est une *rotation*, ce qui correspond parfaitement aux nombreuses remarques faites depuis fort longtemps, qui conduisaient à l'identification du champ magnétique et du tourbillon d'un fluide. Le champ électromagnétique s'identifie, par les équations de MAXWELL (7), à une rotation dans l'espace à 4 dimensions.

4° Aucune unité n'a de dimensions à coefficients fractionnaires. Il semble que ce soit plus logique, puisque toutes les équations de Maxwell sont linéaires.

5° Aucune unité n'est homogène à une longueur seule, ce qui conduirait à la considérer comme une quantité purement géométrique, la géométrie étant une pure convention. Une quantité homogène à une longueur, ne peut être que de nature géométrique (8).

---

(6) Ce qui est conforme aux idées d'Einstein.

(7) Elles expriment qu'un élément de densités cubiques. ρ (densité électrique) subit un déplacement dans l'espace à 4 dimensions.

(8) Dans le système C.G.S. l'équation de dimensions de la capacité est en réalité $L\varepsilon$, ε étant le pouvoir diélectrique du vide.

XIV. — Considération pratiques.

Au point de vue pratique, celui du technicien, le système absolu tel que $m = \text{M}$ ne présente pas d'intérêt particulier pour l'exécution des calculs numériques. C'est un système *absolu* d'unités.

De même que l'on a continué à utiliser, parmi les unités magnétiques, des unités dont la définition fait intervenir l'unité de masse magnétique, alors que la théorie a montré que la conception de la masse magnétique est insoutenable, on pourra toujours continuer à utiliser des Coulomb, des Gauss, des Volts, etc..., en connaissant avec précision les rapports des unités actuelles avec les unités théo riques du système absolu.

Remarquons que la plupart des discussions sur les unités à utiliser pratiquement paraissent en fait vides de sens. Il n'est pas possible, en effet, de donner satisfaction à la fois à tous les utilisateurs, tant sont étendues la science de l'électromagnétisme et ses applications. Parmi les techniciens, certains parlent de mètres carrés d'entrefer, d'autres de millimètres carrés ; les uns de watts ou même de milliwatts et les autres de milliers de kilowatts. De telles différences conduiront toujours les uns à considérer les unités choisies officiellement comme trop grandes, tandis que les autres les jugeront trop petites. Le plus sage est de conserver le système actuel et de ne changer, même les mots employés, qu'avec une grande circonspection afin d'éviter des confusions et des erreurs. En fait un bureau d'étude est spécialisé dans une branche déterminée de l'électricité, tant qu'il reste dans son domaine, aucune erreur ne se produit. La simplicité d'un système n'est appréciée que par les élèves ; il n'est pas mauvais, quoique ce puisse être considéré comme un paradoxe, que les difficultés qu'ils rencontrent leur apprennent à raisonner et leur fasse acquérir de l'attention. Ce n'est pas au technicien et à l'industriel à se plier à leurs desiderata, car ils restent hors du domaine de l'action, des réalisations pratiques ou des recherches de laboratoire.

Conclusion.

Il résulte de ce qui précède que :

1° Les systèmes électrostatiques ou électromagnétiques ne sont pas satisfaisants.

2° Le système dans lequel la 4e grandeur fondamentale est la charge électrique est logique et rationnel, sous réserve de la confirmation de

Tableau I. — Equations de dimensions.

	Unités absolues	Système électrostatique c. g. s.	Système électromagnétique c. g. s.	m charge électrique-unité fondamentale (4 unités fondamentales)
M masse gravifique	M	M	M	M
m masse électrique	M	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	$L^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}$	m
ρ densité électrique cubique	$L^{-3}M$	$L^{-\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	$L^{-\frac{5}{2}}M^{\frac{1}{2}}$	$L^{-3}m$
j densité de courant électrique	$L^{-2}MT^{-1}$	$L^{-\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-2}$	$L^{-\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	$L^{-2}mT^{-1}$
m_1 masse magnétique	LMT^{-1}	$L^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}$	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	LmT^{-1}
B induction magnétique	T^{-1}	$L^{-\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}$	$L^{-\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	$T^{-1}(Mm^{-1})$
H champ magnétique	$L^{-1}MT^{-1}$	$L^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-2}$	$L^{-\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	$L^{-1}mT^{-1}$
μ perméabilité	LM^{-1}	$L^{-2}T^{2}$	0	$Lm^{-1}(Mm^{-1})$
E champ électrique	LT^{-2}	$L^{-\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	$L^{\frac{1}{2}}T^{\frac{1}{2}}T^{-2}$	$LT^{-2}(Mm^{-1})$
ε coefficient d'induction électrostatique	$L^{-3}MT^{-2}$	0	$L^{-2}T^{2}$	$L^{-3}mT^{2}(Mm^{-1})$
V potentiel électrostatique	$L^{2}T^{-2}$	$L^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-2}$	$L^{2}T^{-2}(Mm^{-1})$
I intensité du courant électrique	MT^{-1}	$L^{\frac{3}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-2}$	$L^{\frac{1}{2}}M^{\frac{1}{2}}T^{-1}$	MT^{-1}
R résistance	$L^{2}M^{-1}T^{-1}$	$L^{-1}T$	LT^{-1}	$L^{2}m^{-1}T^{-1}(Mm^{-1})$
C capacité	$L^{-2}MT^{2} = L\varepsilon$	L (1)	$L^{-1}T^{2}$	$L^{-2}mT^{2}(M^{-1}m)$
L coefficient de self induction	$L^{2}M^{-1} = L\mu$	$L^{-1}T^{2}$	L (2)	$L^{2}m^{-1}(Mm^{-1}) = L\mu$
G coefficient de conductance	$L^{2}MT = Lg$	LT^{-1}	$L^{-1}T$	$L^{2}mT(mM^{-1}) = Lg$
S vecteur de Poynting	$L^{-1}MT^{-2}$	$L^{-1}MT^{-2}$	$L^{-1}MT^{-2}$	$L^{-1}MT^{-2}$
f attraction universelle	$L^{3}M^{-1}T^{-2}$	$L^{3}M^{-1}T^{-2}$	$L^{3}M^{-1}T^{-2}$	$L^{3}M^{-1}T^{-2}$
h constante de Planck par unité de volume	$L^{-1}MT^{-1}$	$L^{-1}MT^{-1}$	$L^{-1}MT^{-1}$	$L^{-1}MT^{-1}$

Equations dans le cas où $M = m$

Loi de Newton :
$$\mathcal{F} = f\frac{MM'}{r^2}.$$
Loi de Coulomb électrostatique :
$$\mathcal{F} = f\eta\frac{mm'}{r^2}.$$
Loi de Coulomb magnétique :
$$\mathcal{F} = \frac{f}{c^2}\frac{1}{\mu\mu_e}\frac{m_1m'_1}{r^2}.$$
Biot et Savart :
$$\mathcal{F} = \frac{f}{c^2}\frac{m_1 I dS \sin\alpha}{r^2}.$$
Formule d'Ampère :
$$\mathcal{F} = \frac{f}{c^2}\frac{II'dS\,dS'}{r^2}(2\cos\varepsilon - 3\cos\theta\cos\theta')$$
Loi de Joule : $\mathcal{E} = RI^2t$.
Loi d'Ohm et Joule : $\mathcal{E} = Eit$.
Loi d'Ampère : $I = U$.
Intensité du courant et quantité d'électricité : $m = It$.
Loi de l'induction :
$$V = \frac{f}{c^2}\frac{d\varphi}{dt}.$$
L'unité de charge électrique absolue est égale à $1{,}291 \cdot 10^{-6}$ Coulomb.

(1) Mieux Ll.
(2) Mieux $L\mu$.

la conservation de l'électricité (la définition de l'électricité étant peu précise, il semble que l'accord puisse toujours être obtenu, ne serait-ce que par définition).

3° On peut établir un système dans lequel la masse gravifique et la charge électrique ont même équation de dimensions et définir expérimentalement la charge correspondante, ce qui permet de n'utiliser que trois unités fondamentales au lieu de quatre.

BIBLIOGRAPHIE DES OUVRAGES OFFERTS

Production et utilisation mécanique de l'Electricité

Water Powers of British Columbia. By Arthur W. White, Consulting Engineer, Commission of Conservation assisted by Charles J. Vick. 1 volume cartonné 16 × 24 cm., de 644 pages, 36 planches photogravures, 1 carte ; 2 cartes hors volume. Edité par la Commission of Conservation Canada à Ottawa 1919. (Don de l'ambassade du Canada).

Ce volume, admirablement illustré et d'ailleurs bourré de renseignements de toute nature, débute par des données générales sur les chutes d'eau et les bassins hydrologiques de la Colombie britannique, après un aperçu sur les conditions législatives et administratives régissant les chutes, un chapitre est consacré à l'étude au point de vue physique des principales chutes; un autre, à la topographie, à la description des divers bassins; il se termine par des tableaux de données météorologiques et par une bibliographie très copieuse.

Congrès

XXIII^e Congrès International de La Haye (26 juin-4 juillet 1932). Union Internationale de tramways, de chemins de fer d'intérêt local et de transports publics automobiles.

1^re question. — **Exploitation rationnelle d'un réseau de tramways,** par M. Patz, de Budapest. Une brochure 21 × 27 cm, 22 pages.

Etude rationnelle du prix de la course. — Economie de l'horaire.

3^e question. — **Etude comparative des différents modes de freinage,** M. J. Devienne, en collaboration avec M. X de Larminat. 1 brochure 22 × 28 cm, de 64 pages.

Avantages et inconvénients des différents types de freins : mécanique à air, à vide, à l'huile (système Pieper), freinage rhéostatique, magnétique, récupération. Résultats obtenus.

8^e question. — **Les moteurs de traction et la récupération,** M. L. Bacqueyrisse, directeur général de l'exploitation et des services techniques de la S.T.C.R.P., et le D^r Ingénieur W. Mattersdorff. directeur de la « Hamburger Hochbahn A.G. à Hambourg. 1 brochure 21 × 27 cm, de 121 pages, 67 figures, 3 tableaux, 12 annexes. (Don des éditeurs).

9^e question. — **Horaires économiques pour tramways et lignes d'autobus sur les sections où il y a une circulation très dense,** M. J. Nieuwenhuis, de Rotterdam. 1 brochure 21 × 27 cm. de 23 pages, 17 figures.

7^e question. — **Standardisation des moteurs de traction. — Travaux de la Commission.** 1 brochure, 21 × 27 cm., 14 pages (Don du Secrétariat du Congrès).

Résumé des décisions prises. Projet de règles concernant les moteurs électriques de traction.

14e question. — Application du moteur Diesel à la traction, M. Quarg, directeur de la « Berliner Verkehrs-Aktiengesellschaft » à Berlin. 1 brochure, 23 pages, 10 figures.

16e question. — Etudes expérimentales sur la suspension, la tenue de route et la résistance au roulement des véhicules de transports en commun (appareils et méthodes de mesures; résultats obtenus). de M. Castaing. 1 brochure 21 × 27 cm, de 63 pages, 73 figures

Considérations théoriques. Caractéristiques des suspensions de véhicules (tramways et autobus). Résistance au roulement.

Résultats obtenus dans différents pays.

19e question. — Etude sur les phénomènes de la corrosion électrolytique ; travaux de la Commission. 1 brochure de 31 pages.

Conférence internationale des Grands Réseaux Electriques - Compte rendu des Travaux de la sixième session 18-27 juin 1931, établi par M. Jean Tribot-Laspiere, Délégué général de la conférence. — Trois volumes reliés 16×23 cm. [Tome I. 859 pages. — Tome II. 615 pages. — Tome III. 1042 pages avec figures]. 54 Avenue Marceau Paris. (Don de la conférence des grands réseaux).

Tome I. — Notice sur la session. — Rapports généraux. — Liste des membres de la session. — Travaux de la 1re section 19 et 20 juin. — Production et transformation du courant. — Textes des rapports présentés. — Discussion de ces rapports : chaudières, alternateurs, isolants, transformateurs, divers, huiles isolantes, interrupteurs dans l'huile, postes et sous-station.

Tome II. — Travaux de la 2e section 22 et 23 juin — Construction, isolation et entretien des lignes. — Textes des rapports présentés. — Discussion de ces rapports : Isolateurs, calcul et construction des lignes, pertes en ligne, pylones, câbles à haute tension, conducteurs et clause des conducteurs, troubles causés à la T.S.F. par les réseaux à haute tension.

Tome III. — Travaux de la 3e section 25 et 26 juin. — Exploitation interconnexion et protection des réseaux. — Texte des rapports présentés. — Discussion de ces rapports : puissance réactive, neutre à la terre, surtension et production non sélective, protection contre la foudre, mesures et appareils de mesures, exploitation des réseaux et protection sélective, marche en parallèle. Divers.

Recherches physiques. — Appareils de mesure

Sur une forme plus restrictive des Relations d'incertitude, d'après MM. Landau et Peierls, par Louis de Broglie.

Actualités scientifiques et Industrielles. Exposés de Physique Théorique. Publiés sous la Direction de M. Louis de Broglie Professeur, à la Sorbonne, lauréat du Prix Nobel.

Une brochure 1076, 16 × 25 cm de 24 pages. Editée par Hermann et Cie, 6 rue de la Sorbonne, Paris, 1932. Prix 6 francs (Don de l'Editeur).

Le fascicule contient une analyse accompagnée de commentaires d'un récent mémoire de MM. L. Landau et T. Peierls (Zeitschrift für Physik Band 69 p. 56 et suiv.). Dans ce travail, qui a pour origine de profondes remarques de Dohr, les auteurs ont montré que, si l'on introduit dans la nouvelle mécanique les conceptions fondamentales de la relativité, on est amené à écrire des relations d'incertitude plus restrictives que celles de Heisemberg, aussi bien pour les grandeurs électromagnétiques que pour les grandeurs mécaniques. Cette circonstance semble imposer des limites au domaine de validité des méthodes usuellement employées dans la nouvelle mécanique et devoir jouer un grand rôle dans la théorie des phénomènes dont le noyau de l'atome est le siège.

Publications Scientifiques et techniques du Ministère de l'air. Service des recherches de l'Aéronautique. Application des Méthodes interférentielles

à l'étude de l'écoulement des gaz aux grandes vitesses, par R. TREMBLOT, Docteur ès sciences. 1 brochure de 19 × 27 cm., de 72 pages, 30 figures, en vente chez Blondel la Rougery, 7 rue Saint-Lazarre, Paris et Gauthier-Villars, 55 quai des Grands-Augustins, Paris (1932). (Don du service de l'aéronautique).

Examen des méthodes applicables à l'étude de l'écoulement des gaz. Dispositifs interférentiels. Etude de la détente de l'air. Etude de l'aile d'avion.

La Projection de noyaux atomiques par un rayonnement très pénétrant. L'Existence du neutron, par Irène CURIE et F. JOLIOT.
Actualités Scientifiques et Industrielles. Exposés de physique théorique, publiés sous la direction de M. Louis de Broglie, professeur à la Sorbonne, lauréat du Prix Nobel.
Une brochure, 16 × 25 cm de 22 pages, 4 fig., 3 clichés. Editée par Hermann et Cie, 6 rue de la Sorbonne, Paris, 1932. Prix 6 francs (Don de l'Editeur).

Les expériences de Bothe et Becker ont montré que certains éléments légers émettent un rayon γ pénétrant lorsqu'on les bombarde avec des particules α. Les auteurs ont repris ces expériences en vue de déterminer, d'une part, les pouvoirs pénétrants des rayons excités dans les noyaux légers et d'essayer d'en déduire les énergies quantiques correspondantes et, d'autre part, d'examiner si les rayonnements de quantum très élevé que l'on peut ainsi produire artificiellement sont susceptibles de provoquer des effets nouveaux par leur passage dans la matière.

Exposé électronique des lois de l'électricité, par Marcel BOLL. Un volume 14 × 22 cm, de 72 pages, avec 22 figures. Edité par Hermann et Cie, 6 rue de la Sorbonne, Paris, 1932. Prix : 15 francs. (Don de l'Editeur).

L'électron a été pour ainsi dire, monopolisé par les théoriciens. Les exposés didactiques ont pris l'habitude de n'introduire cette conception qu'*in extremis*, au moment où l'on ne peut plus s'en passer : en le voyant surgir à propos de la lampe à 3 électrodes ou de la cellule photo-électrique, le lecteur ne peut guère saisir d'où il vient. M. Marcel Boll s'est appliqué à introduire cette notion d'électron dans les phénomènes usuels de l'électricité. Il a pensé qu'il y avait place pour un opuscule qui tout en se bornant aux connaissances mathématiques les plus répandues, donnerait un exposé succinct et systématique des lois de l'électricité, telles qu'elles sont conçues par les physiciens d'aujourd'hui. C'est le but du présent ouvrage qui se divise comme suit :
— Propriétés générales de l'électron ;
— Lois du courant électrique dans les métaux ;
— Electromagnétisme et induction dynamique ;
— Self induction, préférence propre ;
— Puissance active et puissance réactive ;
— Induction statique et radio-électricité.

L'idée générale de la mécanique ondulatoire et de ses premières applications, par Marcel BOLL. 1 volume broché 14 × 20 cm., de 74 pages. Edité par Hermann et Cie, 6 rue de la Sorbonne. Paris, 1932. Prix : 15 francs. (Don de l'éditeur).

Par suite de l'importance des nouvelles conceptions qui sont venues bouleverser la physique dans ces dernières années, l'auteur a cru rendre service à un grand nombre d'esprits curieux en rassemblant dans son ouvrage diverses études où les théories acquises sont exposées de la façon la plus élémentaire possible et aussi la plus synthétique. L'idée de la mécanique ondulatoire a été présentée sous un aspect purement formel, puisque l'irreprésentabilité des processus sous-atomiques (principe d'incertitude) ne fait plus aucun doute pour personne. Les premières applications de la mécanique ondulatoire s'étendent sur les chapitres les plus divers des sciences physiques : émission de la lumière, courant électrique, fondements de la chimie.

Les grandes divisions de l'ouvrage sont les suivantes :
I. — La liaison entre l'optique et la mécanique ;

II. — Les relations d'incertitude;
III. — Les niveaux d'énergie;
IV. — Valence et affinité chimiques;
V. — La conduction électrique des métaux.

Etude des trajectoires et des qualités aérodynamiques d'un avion par l'emploi d'un appareil cinématographique de bord. Par A. Magnan et A. Sainte-Laguë. Publications Scientifiques et Techniques du ministère de l'Air. Service des Recherches de l'Aéronautique. 1 brochure de 19 × 27 cm, de 98 pages, 72 figures en vente chez Blondel la Rougery 7 rue Saint-Lazare, Paris et Gauthier Villars, 55 quai des Grands-Augustins, à Paris (1932). (Don du service de l'aéronautique).

Etude théorique et résultats d'expériences. Survol de différents terrains.

Handbuch der Experimentalphysik. Elektrodynamik. Livre de Physique expérimentale. Electrodynamique. Par Gustave Mie, Professeur à l'Université de Fribourg en Brisgau. 1 volume relié de 18 × 25 cm. de 502 pages, 210 figures (volume acquis sur les fonds du prix Loutreuil). Edité par la Akademische Verbagsgesellschaft, à Leipzig (1932).

Ce volume comprend 3 parties :

La première partie concerne l'étude du champ magnétique et du courant électrique.

La deuxième partie est consacrée à l'étude des actions dynamiques du champ magnétique.

Dans la troisième partie, on étudie les champs électrodynamiques.

Mesure du rendement de petites génératrices électriques. Mémoire présenté à la faculté des sciences de l'Université de Paris pour l'obtention du diplôme d'Etudes supérieures par Michel Conard, 1932. 1 brochure 24 × 16 cm. Jouve et Cie, Editeurs, 15 rue Racine, Paris (Don de l'auteur).

Les cahiers des charges officiels imposent la détermination du rendement des petites génératrices d'avions (300 à 1.200 watts 24 volts, 4500 t: mn) à l'aide d'un moteur taré dont on mesure la consommation. Il a paru à l'auteur qu'il y avait intérêt à mesurer directement la puissance mécanique transmise à la génératrice par un procédé torsiométrique — Il a réalisé un montage optique qui permet de mesurer, pendant la rotation, l'angle de torsion d'un arbre de transmission — Il a appliqué cette méthode à la mesure du couple transmis par un moteur à une petite génératrice électrique et en a déduit son rendement à pleine charge à 1/1000 près.

IL Y A TRENTE ANS

Réunion ordinaire mensuelle du 3 décembre 1902

Présidence de M. E. HARLÉ

Des 2 membres élus dans cette séance, nous comptons encore parmi nous M. Jean de TRAZ.

M. le Professeur RICCARDO ARNO, de Milan, fait une communication sur un compteur imaginé par lui pour la *mesure exacte de l'énergie dans les installations triphasées asymétriquement chargées.*

Le Conférencier expose la théorie et donne la description de l'appareil ; un tableau de résultats d'essais montre que l'erreur maxima est inférieure dans tous les cas à 1 pour 100.

M. PICOU présente un *perméamètre universel.*

Le qualificatif universel, signifie que le perméamètre se prête facilement, le premier de son espèce, à la mesure des tôles, des barrettes, ou même, à la rigueur, des fils bien dressés.

L'instrument est indépendant de la perfection des joints. La mesure est ramenée à une méthode de zéro, suivant une idée de M. ARMAGNAT. Ces deux qualités rendent l'appareil vraiment industriel.

M. G. CHARPY fait une communication *sur les aciers doux employés dans la construction des machines électriques.*

Le Conférencier résume les moyens d'investigation auxquels le métallurgiste peut avoir recours pour progresser dans l'étude des propriétés électriques et magnétiques des aciers.

Il rappelle les résultats des études métallographiques et examine les conséquences qui en peuvent être déduites au point de vue de la résistivité, de la perméabilité, et de l'hystérésis des tôles employées dans les machines électriques.

BAR-LE-DUC. — IMP. COMTE-JACQUET. *Le gérant :* Alfred MAGNIER.

TABLE MÉTHODIQUE DES MATIÈRES

CONTENUES DANS LE TOME II (5e SÉRIE)

CLASSIFICATION

A. — PRODUCTION ET UTILISATION MÉCANIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ

PAGES

1° Communications faites a la Société et Travaux des Sections

2° Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

PAGES

3° Il y a trente ans

B. — ÉCLAIRAGE ET CHAUFFAGE. — RADIATIONS DIVERSES

1° Communications faites a la Société et Travaux des Sections

2° Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

3° Il y a trente ans

C. — CHIMIE. — ELECTROCHIMIE. ELECTROMETALLURGIE. — PILES. — ACCUMULATEURS

1° Communications faites a la Société et Travaux des Sections

2° Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

D. — APPAREILLAGE GÉNÉRAL CANALISATION. — TRACTION

PAGES

1° Communications faites a la Société et Travaux des Sections

2° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

3° IL Y A TRENTE ANS

E. — TÉLÉGRAPHIE. — TÉLÉPHONIE. — TRANSMISSIONS PAR ONDES

1° COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ ET TRAVAUX DES SECTIONS

2° OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ ET BIBLIOGRAPHIE

3° Il y a trente ans

F. — RECHERCHES PHYSIQUES. — PHYSIOLOGIE APPAREILS ET METHODES DE MESURES

1° Communications faites a la Société et Travaux des Sections

2° Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

3° Il y a trente ans

G. — LÉGISLATION

Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

H. — AÉRONAUTIQUE

Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

I. — MATHÉMATIQUES. — MÉCANIQUE RATIONNELLE MÉCANIQUE APPLIQUÉE

Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

J. — CONGRÈS. — EXPOSITIONS. — ACTES OFFICIELS. — ANNUAIRES ÉTUDES ÉCONOMIQUES INVENTAIRES. — STATISTIQUES. — COMMÉMORATIONS, BIOGRAPHIE

Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

K. — FORMULAIRES. — AIDE-MÉMOIRES. — MANUELS DICTIONNAIRES

Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

L. — ENSEIGNEMENT ET DIVERS

PAGES

Ouvrages offerts a la Société et Bibliographie

M. — COMMUNICATIONS ET INFORMATIONS DIVERSES

Il y a trente ans

Table des noms d'auteurs

CITES DANS LE TOME II (5e SERIE

PAGES

COMMUNICATIONS FAITES A LA SOCIÉTÉ

OUVRAGES OFFERTS A LA SOCIÉTÉ et BIBLIOGRAPHIE

IL Y A TRENTE ANS

Note de la Rédaction.

L'an dernier, l'Institution of Electrical Engineers conviait les Membres de notre Société à prendre part à la célébration du centenaire des découvertes de Faraday, à Londres, du 21 au 26 septembre 1931. Une quarantaine de nos Membres répondirent à cet appel, dont, en premier lieu, notre Président, M. le Professeur Henri Chaumat. Ils assistèrent aux diverses cérémonies organisées en l'honneur de Faraday par la Royal Institution et par l'Institution of Electrical Engineers ainsi qu'à la très brillante et instructive exposition, ouverte à cette occasion à l'Albert Hall et ils purent prendre part à quelques-unes des très nombreuses visites techniques organisées par l'Institution.

A son retour en France, M. le Professeur Chaumat convia les personnalités dirigeantes de la Royal Institution, de l'Institution of Electrical Engineers et de la British Association à notre Semaine de novembre et au dîner qui fut présidé par M. Pomaret, Sous-Secrétaire d'Etat à l'Enseignement Technique.

M. Chaumat fit, à l'ouverture de la Semaine, une conférence sur Faraday, dans laquelle il résumait l'ensemble de ses travaux.

D'autre part, le Journal Le Times avait publié, le 21 septembre 1931, un numéro spécial où 13 pages étaient consacrées, par les principaux savants de divers pays, à la glorification de Faraday.

Notre Société a pensé qu'il serait agréable à ses Membres de recevoir, en supplément aux Bulletins habituels, un numéro contenant, avec le texte de la Conférence de M. Chaumat, la traduction des articles du Times. Le Directeur de ce Journal a bien voulu nous autoriser gracieusement à publier cette traduction et les différents auteurs

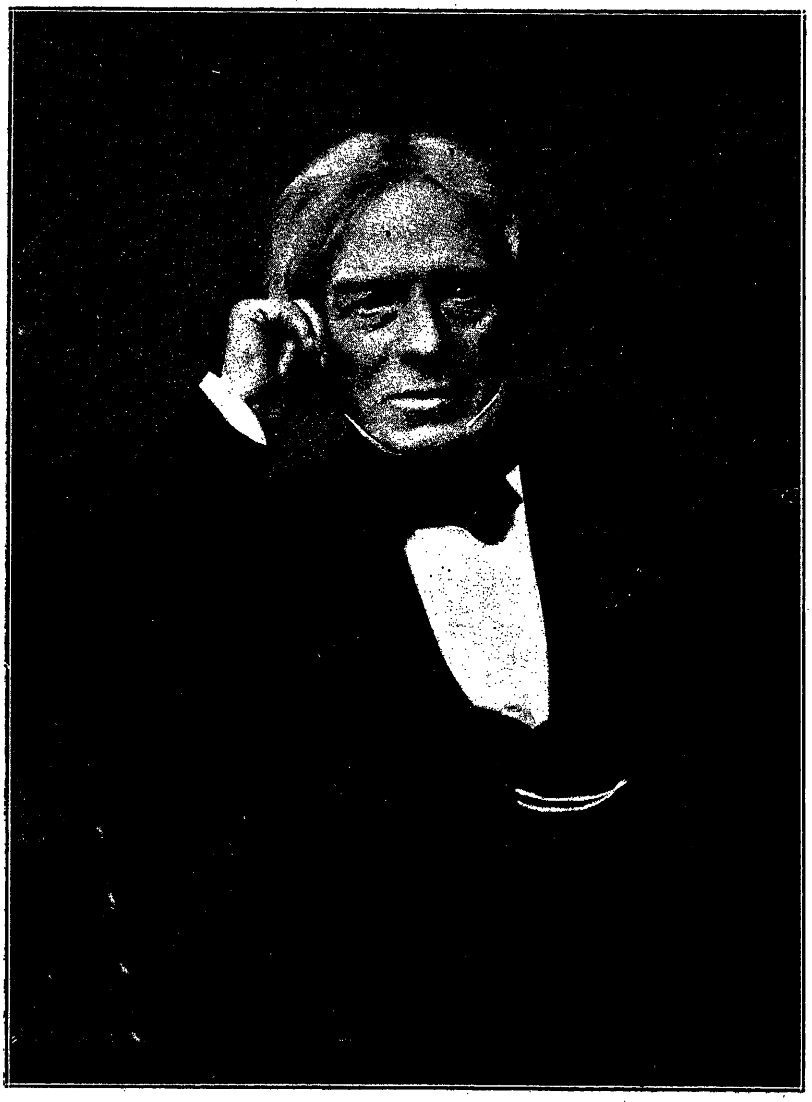
ont bien voulu se déclarer d'accord. Nous les prions de vouloir bien trouver ici l'expression de notre vive reconnaissance.

Un des auteurs a malheureusement disparu depuis, c'est le célèbre Professeur Ostwald.

La Royal Institution, à la demande de M. Rowell, Secrétaire de l'Institution of Electrical Engineers, a bien voulu nous autoriser à reproduire les photographies dont elle disposait; nous la remercions très vivement ainsi que le Rischgitz International Art Supply Agency à qui nous devons la photographie de la page de garde.

Nous devons aussi remercier notre ancien Président, M. Paul Bunet, M. Bellini, Secrétaire de la 5e Section et M. Montoriol, qui ont bien voulu nous aider de leurs lumières pour la traduction d'articles particulièrement techniques.

Nous remercierons enfin tout spécialement le Syndicat Professionnel des Producteurs et Distributeurs d'Energie Electrique et les diverses Sociétés qui ont bien voulu nous apporter en cette circonstance une aide matérielle qui nous fut si précieuse.



MICHEL FARADAY

Photograpie reproduite avec l'autorisation du Rischgitz International Art Supply Agency.

Sommaire.

Pages

Conférence de M. le Professeur Henri CHAUMAT

le 23 Novembre 1931

LA VIE ET L'OEUVRE DE MICHEL FARADAY [1]

par M. Henri Chaumat

Ancien Président de la Société française des Electriciens.

La « *Royal Institution* » de Grande Bretagne et « *l'Institution of Electrical Engineers* », c'est-à-dire deux des plus célèbres associations de l'Angleterre, se sont réunies pour célébrer le centenaire de la principale découverte de l'un des plus illustres parmi les savants qui ont marqué l'histoire des progrès de l'humanité, Michel Faraday.

Il s'agit de la découverte de l'induction électromagnétique, faite le 29 août 1831.

Et si les deux compagnies se sont réunies pour cette commémoration, c'est, d'une part, parce que cette découverte a été faite dans les laboratoires de la *Royal Institution* à laquelle appartint Michel Faraday dès le mois de mars 1813 et dont il devait porter par la suite la réputation et le rayonnement au plus haut degré.

D'autre part, la célébration de ce centenaire devait intéresser les électriciens, car toute l'industrie électrique est tributaire de l'Induction électromagnétique. Toutes les machines, génératrices ou moteurs, à courant continu ou à courants alternatifs, qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique ou inversement ; tous les appareils dits transformateurs qui ne font que changer la forme de l'énergie électrique et permettent le transport à grande distance de la force motrice; toutes ces machines, dans leur constitution, dans leur mode de fonctionnement, sont basées sur les lois de l'Induction électromagnétique.

Sans cette découverte fondamentale de Faraday et sans les travaux et recherches qui, de la part de milliers de savants des principaux pays, en ont été la suite et le couronnement, aucune application de l'électricité, ni les grands transports de force motrice, ni la traction électrique, ni l'électrochimie n'eussent été possibles. Et l'on imagine mal ce qu'aurait pu être le développement industriel du monde sans cela.

(1) Conférence faite par M. le Président H. Chaumat lors de la Semaine de novembre 1931.

Michel Faraday est né le 22 septembre 1791 à Newington Butts.

Il était le troisième d'une famille de quatre enfants, qui était originaire d'Irlande. Cette famille était des plus modestes et le père, forgeron, faisait vivre les siens de son travail.

La période qui couvre la fin du 18e siècle et le commencement du 19e est une période d'extrême détresse pour les classes laborieuses.

Le prix de la farine avait triplé entre 1760 et 1804... ; les salaires n'avaient pas suivi le prix de la vie... ; les campagnes se désertaient... Ne croirait-on pas parler de notre temps. C'était l'époque des guerres de Napoléon, qui présente en effet de grandes analogies avec la nôtre, tant il est vrai que les guerres engendrent toujours, entre autres maux, misère et vie chère.

Les Faraday avaient dû faire appel aux secours publics en 1801. Le plus bas de la misère fut atteint en 1802 et 1803. Le père était tombé malade. Son fils aîné, Robert, devait le remplacer et notre héros, Michel, fut, pendant huit années, d'abord apprenti relieur, puis ouvrier chez un libraire et il vivait dans la maison de son patron, gagnant tout d'abord juste de quoi manger.

Par suite de cet état misérable, la culture de Michel Faraday fut fort élémentaire, bornée à la lecture, à l'écriture et aux rudiments de l'arithmétique.

Mais Faraday avait le goût des livres, un goût exceptionnel qui s'était affirmé de très bonne heure et qui ne fut pas étranger au choix de sa profession.

Ses lettres heureusement conservées et les témoignages contemporains le dépeignent comme très enthousiaste, très émotif. Il lisait, dit-on, les poèmes de Byron avec des larmes.

De très heureux dons équilibrent cette exaltation. Il est consciencieux, appliqué ; il s'étudie, analyse ses sentiments avec rigueur, se montre sévère pour lui-même et veut voir clair en lui dès sa plus extrême jeunesse. C'est pourquoi il montre un goût particulier pour les ouvrages scientifiques et les faits contrôlés. Parmi les faits scientifiques, ceux de la chimie, en raison d'un appareillage simple, sont les plus faciles à reproduire et Faraday, à qui son frère aîné avait pu payer quelques leçons dès 1810, se passionne pour la chimie et cherche à reproduire les expériences qu'il a vu faire ou dont il a lu la description.

Il fait montre d'un très grand désintéressement et il est curieux de noter que cet homme, dont les découvertes allaient révolutionner le monde par leurs applications, ne s'attache qu'aux recherches de

science pure. C'est la vérité seule, la vérité des causes qui l'attire : les applications ne le retiennent pas.

Il est généreux, donne largement, ne se soucie pas de l'avenir. Il fait d'ailleurs partie d'une secte religieuse où l'on s'interdit l'épargne. « Le Seigneur y pourvoira » dit-il volontiers.

Il se maria le 12 juin 1821 avec la fille d'un joaillier, SARAH BARNARD, qui faisait partie de la même secte que lui-même. Cet événement lui donna le bonheur familial et la paix de l'esprit. L'union, dit-il lui-même dans une de ses lettres, a continué pendant 28 ans, elle n'a changé d'aucune manière, sauf par sa force et par sa profondeur.

Nul doute que cette heureuse union, qui apporta à FARADAY la paix du cœur, permit à son puissant esprit son plein épanouissement. Les fiançailles avaient été longues. MICHEL FARADAY et SARAH BARNARD avaient eu le temps de se connaître, de s'apprécier et d'être sûrs qu'une sympathie profonde unissait leurs vies. On raconte que la journée du mariage se passa comme les autres et que FARADAY travailla dans son laboratoire de la *Royal Institution* durant l'après-midi.

Grâce à l'influence de DAVY, FARADAY fut autorisé à amener sa jeune femme dans une chambre à la *Royal Institution* où le ménage occupa par la suite les appartements dont les titulaires successifs avaient été YOUNG, DAVY et BRANDE.

FARADAY mourut à Hampton Court le 25 août 1867. Ses dernières années furent attristées par une sorte de paralysie de la mémoire, qui, sans atteindre la valeur profonde de son esprit, l'empêchait de continuer avec suite des travaux fructueux. Mais il reste environ un demi-siècle d'un labeur formidable touchant à tant de domaines et d'une telle valeur qu'il a mérité sans conteste d'être appelé le plus grand expérimentateur que le monde ait jamais vu. Il a publié ses travaux dans un ouvrage célèbre, « *Recherches expérimentales* » où chaque paragraphe est numéroté. Ses notes de laboratoire se rapportant à cet ouvrage et qui ont été heureusement conservées, sont de même numérotées : le dernier paragraphe porte le numéro 16041.

Il faut se borner dans cette vie si remplie, aux choses essentielles pour donner une idée de la valeur des travaux de MICHEL FARADAY. Mais il est nécessaire cependant d'insister sur l'événement heureux qui devait avoir sur sa vie une influence décisive. C'est sa rencontre avec DAVY.

Au commencement du 19e siècle, des découvertes sensationnelles remuaient les esprits. A la suite de la découverte de l'action de l'élec-

tricité sur les muscles de la grenouille par GALVANI, à Bologne, en 1786, et de sa célèbre controverse avec un professeur de Pavie, VOLTA, ce dernier créa la pile qui est peut-être, comme on l'a dit, la plus simple et la plus merveilleuse des inventions. La pile mettait aux mains des savants un instrument d'investigation incomparable : l'électricité était définitivement asservie.

C'est la pile qui permet à NICHOLSON de décomposer l'eau en 1801 avec la batterie puissante de la *Royal Institution*. Dans ce même laboratoire, DAVY exécute pendant cinq années, toute une série de décompositions. Ce qui frappe surtout, c'est la décomposition de la potasse caustique à l'état fondu et la découverte du potassium, ce métal extraordinaire qui donne une flamme au contact de l'eau. Il fait triompher, avec RUMFORD, la théorie de la nature vibratoire de la chaleur. DAVY découvre le phénomène de l'arc électrique.

Toutes ces expériences sensationnelles font que la Société accourt en foule aux conférences de la *Royal Institution*. Elle y est attirée non seulement par l'attrait des expériences scientifiques et l'éclat du premier arc électrique, mais aussi par le charme et l'éloquence enthousiaste du jeune expérimentateur. DAVY attendait tout de la science : Il espérait une amélioration des conditions actuelles par l'union de tous dans le savoir et les arts utiles « Nous tenons déjà, « disait-il, l'aurore de ces jours heureux que nous pouvons raison- « nablement attendre. »

DAVY avait un caractère à la hauteur de son savoir. Il avait inventé la lampe de sûreté qui porte son nom et à laquelle tant de mineurs doivent la vie et il avait refusé d'en tirer bénéfice.

COLERIDGE, à qui l'on demandait de désigner celui qui l'avait le plus impressionné parmi les savants qu'il avait connus, répondit : « DAVY les dépasse tous. Son esprit souple et vif peut embrasser tous « les sujets. Les pensées brillantes giclent de son cerveau comme « la boue sous les pieds... »

C'est un homme que FARADAY eut la bonne fortune de rencontrer. Un des habitués du libraire chez qui travaillait FARADAY, avait pu lui procurer une carte d'auditeur pour assister aux conférences de DAVY à la *Royal Institution*.

FARADAY y prit des notes qu'il rédigea avec soin. Il les envoya à DAVY en lui disant son désir de se consacrer à la science « qui rendait ses serviteurs aimables et libéraux » et en le priant de vouloir bien lui accorder son appui à l'occasion.

DAVY sourit de ces idées naïves sur la supériorité morale des savants. Il convoqua cependant FARADAY à la *Royal Institution*, le fit

causer, l'encouragea dans son désir de servir la science tout en lui recommandant de ne pas négliger les perspectives d'avenir qu'il avait devant lui, la science rémunérant mal ceux qui se vouent à elle exclusivement. Il l'informait cependant de la vacance d'un poste d'assistant au laboratoire de la *Royal Institution* et devant la volonté et l'enthousiasme de FARADAY, il réussit à l'y faire entrer en mars 1813.

Quelques mois après, DAVY emmenait FARADAY comme secrétaire et assistant dans un voyage en France, Italie et Suisse, avec un passeport de NAPOLÉON, malgré l'état de guerre entre la France et l'Angleterre. Ce voyage d'études avait pour but de prendre contact avec les savants les plus réputés de ces pays, de les voir dans leurs laboratoires et de répéter avec eux leurs principales expériences.

Pendant les quelques mois qui précédèrent le départ en octobre, DAVY, aidé de FARADAY, réussit à montrer que le chlore ne contenait pas d'oxygène et était un corps simple. Et il prépara le composé de chlore et d'eau connu sous le nom d'hydrate de chlore avec lequel FARADAY devait plus tard, conseillé par DAVY, réussir à liquéfier le chlore.

C'est au cours de ce voyage à Paris, que DAVY et FARADAY rencontrent DUMAS au Jardin des Plantes, ARAGO à l'Observatoire. AMPÈRE vint un matin voir DAVY et lui apporta une substance nouvelle que venait de découvrir un fabricant de salpêtre du nom de COURTOIS. Ces chimistes français furent surpris, comme l'attesta plus tard DUMAS, de la variété et de l'ingéniosité des expériences auxquelles DAVY soumit cette nouvelle substance qu'ils croyaient être un corps composé. DAVY démontra par la suite que c'était un corps simple : l'iode.

Le voyage continua par l'Auvergne où l'on fit de la géologie, le Dauphiné, la Provence.

De Nice, ils vont à Turin par le Col de Tende, à Gênes où l'on fait des expériences pour essayer de montrer l'analogie de la décharge du poisson nommé torpille avec le courant électrique donné par la pile de VOLTA. Mais on ne peut réussir à décomposer l'eau. On ne conclut pas cependant à la négative en raison de la petite taille du poisson et de la température peut-être trop basse ; on était en février 1814. C'était la prudence et la sagesse scientifiques.

A Florence, DAVY se rendit au laboratoire de *l'Academia del Cimento* où il poursuivit ses travaux sur l'iode. C'est dans le même laboratoire que DAVY réussit à faire brûler du diamant dans un ballon rempli d'oxygène, en concentrant sur lui la chaleur solaire avec une forte lentille (le verre brûlant le Grand Duc). Il démontra que

cette combustion donnait du gaz carbonique pur, ce qui attestait la véritable nature du diamant.

On va à Rome, à Naples où l'on ne manque pas de faire par deux fois l'ascension du Vésuve. Et l'on y dîne un soir aux bords du cratère, à la lueur des torches, de poulet, de fromage et d'œufs cuits par la lave. On porte la santé de la « Vieille Angleterre » et l'on entonne le *God save the King* et le *Rule Britannia*. Un peu à l'écart, un Russe qui les a suivis chante lui aussi ses chants nationaux.

Faraday s'émeut devant les environs de Terni couverts d'orangers, de myrtilles et de géraniums sauvages. Il en admire la belle cascade de 200 pieds. Il ne se doutait pas que grâce à ses propres découvertes, cette cascade devait devenir, un peu plus d'un siècle après, une importante source d'énergie électrique.

On quitte Rome en juin, on salue au passage à Milan le vieux Volta, alors au déclin de sa vie, et l'on arrive à Genève en juillet où Davy, sa femme et Faraday furent les hôtes du professeur de la Rive dont Faraday fit la conquête. C'est avec de la Rive que Faraday devait entretenir plus tard la première de ses nombreuses correspondances scientifiques.

On quitte Genève en septembre, on revient à Rome par Vicence, Venise, Bologne, Florence ; on renonce à aller à Constantinople où, leur dit-on, la peste fait des ravages.

En mars 1815 on est encore à Rome. Napoléon s'était évadé de l'Ile d'Elbe. Les Cent jours commençaient. Les Romains s'agitaient dans l'attente des décisions de Murat. Le retour est décidé. On a de la peine à trouver des chevaux de poste. On arrive cependant en avril à Bruxelles, et c'est enfin le retour dans la mère patrie dans la dernière semaine d'avril.

Le 7 mai 1815, Faraday reprend son poste à la *Royal Institution* qu'il ne devait plus quitter.

On ne peut douter que ce voyage de 18 mois avec Davy, et les contacts directs avec les savants les plus remarquables de l'époque n'aient eu sur le développement de l'esprit de Faraday l'influence la plus décisive.

Les recherches ne tardent pas à commencer : ce sont, en 1818, des expériences sur les flammes sonores étudiées par de la Rive. Les expériences de Faraday montrent que l'explication qu'en avait donnée le professeur genevois était vraie.

De 1818 à 1820, Faraday s'instruit comme assistant de Brande et publie quelques menus travaux.

En 1820, il publie un mémoire sur 2 nouveaux composés de chlore

et de carbone et un nouveau composé d'iode, carbone et hydrogène. Ce mémoire fut lu à la *Royal Society* le 21 décembre 1821 et fut le premier qui eut l'honneur d'une publication dans les *Philosophical Transactions*.

La découverte d'Œrsted, en 1819, sur l'action directrice d'un courant sur l'aiguille aimantée est, après la découverte de la pile de Volta, le second événement qui fait époque dans l'histoire de l'Electricité.

Pendant les 20 années qui séparent ces deux événements, on s'était occupé surtout de l'action chimique des courants et l'on voyait surtout dans l'électricité un agent de décomposition. Les effets physiques de l'électricité allaient prendre désormais un grand essor.

Les expériences d'Œrsted furent reprises par tout le monde. Wollaston essaya de transformer la déviation d'Œrsted en une rotation continue. Les tentatives étaient faites devant Davy, à la *Royal Institution*. Faraday est tout à fait séduit, reprend de son côté les essais et, un matin de Noël 1821, il appelle sa femme et la rend témoin de la rotation d'une aiguille aimantée autour d'un courant.

En 1821, il étudie la vaporisation du mercure à la température ordinaire et, en collaboration avec M. Stodart, il découvre de nouveaux aciers.

En 1823, Faraday étudie l'hydrate de chlore, en fait l'analyse et, sur la suggestion de Davy, chauffe ce corps en tube scellé. Ce corps se sépare en deux parties, de l'eau et du chlore qui, sous l'influence de sa propre pression, se liquéfie en une sorte d'huile qui donnait un aspect gras au tube d'expérience.

Le Dr Paris qui entrait par hasard à ce moment, railla le jeune chimiste sur le peu de soin qu'il montrait en employant des récipients souillés. Le lendemain matin, il recevait ce mot de Faraday :

« Cher monsieur, l'huile que vous avez vue hier n'était autre que du chlore liquide. »

Il n'est guère possible d'être plus concis.

Davy et surtout Faraday étudient les conditions de la liquéfaction des gaz et Faraday réussit à amener à l'état liquide nombre de gaz réputés jusqu'alors permanents.

En 1823 Faraday est élu membre de la *Royal Society*, malgré une opposition assez singulière de Davy.

En 1825 et 1826, Faraday publie deux nouveaux mémoires sur de nouveaux composés de carbone et d'hydrogène et sur l'acide sulfonaphtalique. Dans le premier de ces mémoires, il annonce la *découverte du benzol* qui devait devenir, entre les mains des chimistes modernes, la base des couleurs d'aniline.

En 1825, il devient membre d'une Commission nommée par la *Royal Society* pour examiner et perfectionner la fabrication des verres d'optique. Les travaux se poursuivent pendant plusieurs années et conduisent à des résultats très remarquables.

C'est en 1825 que FARADAY fut nommé directeur du laboratoire de la *Royal Institution* qui n'était pas riche et qui lui allouait pour ces fonctions un salaire de 200 livres.

Malgré la modicité de ce traitement, il ne voulait pas d'autre fonction rétribuée pour se consacrer entièrement à la *Royal Institution* et lui montrer ainsi sa reconnaissance. Il refuse en 1827 la chaire de Chimie de l'*Université de Londres*. Et c'est en 1853 seulement qu'il devint superintendant de la *Royal Institution* aux appointements de 300 livres.

De 1823 à 1830, les travaux de FARADAY lui avaient acquis déjà une grande réputation dans sa patrie et à l'étranger.

AMPÈRE lui écrivait : « La chimie et la physique ont toutes deux été « honorées de vos travaux et je vous dois personnellement beaucoup « pour vos expériences sur les rotations électromagnétiques. »

On ne se doutait pas cependant qu'il allait faire des découvertes qui devaient, en quelques années, lui donner, parmi les savants de l'Europe, une réputation plus grande encore que celle de DAVY, il s'agit des phénomènes d'induction électromagnétique et ces recherches méritent une description particulière un peu étendue.

Peu de temps après l'expérience d'ŒRSTED, ARAGO, se basant sur la théorie du magnétisme d'AMPÈRE, avait réussi à aimanter du fer par un courant électrique.

DAVY et FARADAY l'apprirent aussitôt et répétèrent les expériences.

Dès 1825, FARADAY essaie de voir si le courant envoyé dans une bobine est plus ou moins grand quand il y a un aimant dans son axe. L'expérience est négative. Il avait pourtant observé une variation de l'aiguille du galvanomètre quand l'aimant traversait la bobine : c'était déjà de l'induction.

Il multiplie les expériences de ce genre de 1825 à 1828 en faisant passer un courant dans un circuit placé dans le voisinage d'un circuit relié à un galvanomètre et isolé du premier. Il ne remarquait rien, n'observant le galvanomètre que pendant le passage du courant.

Enfin, en 1831, le 29 août, il fait sa découverte sensationnelle. Deux circuits, isolés l'un de l'autre, sont bobinés sur un anneau de fer. L'un des circuits peut être mis en relation avec une pile, l'autre, sans communication avec le premier, est relié à un galvanomètre.

FARADAY note une déviation de l'aiguille quand on établit le cou-

rant dans le premier circuit ou quand on le coupe. Il s'attendait à voir l'aiguille faire quelque chose pendant le passage du courant. Il s'incline devant l'expérience et note l'existence et le sens de cette sorte de vague d'électricité (c'est le courant induit) qui apparaît dans le deuxième circuit quand le courant inducteur s'établit ou se coupe dans le premier.

En septembre et octobre de la même année, il obtient des courants induits sous l'action seule des aimants. Dans l'une des expériences, le 24 septembre 1831, un circuit est bobiné autour d'un cylindre de fer et relié à un galvanomètre. Des courants induits prennent naissance quand on approche ce système d'un pôle d'aimant ou quand on l'éloigne. Dans une autre expérience, le 17 octobre 1831, une bobine creuse est reliée à un galvanomètre. Un courant induit se produit quand on enfonce un aimant dans la bobine. Un courant induit inverse se développe quand on retire l'aimant.

FARADAY demande ce *qui s'est passé dans l'espace entre le fer aimanté et le fil de cuivre.*

Les expériences se multiplient, deviennent plus précises et plus nettes.

L'approche ou la naissance d'un courant inducteur fait naître, dans un circuit voisin fermé, un courant induit. La cessation du courant inducteur ou son éloignement fait, de même, naître un courant induit inverse du précédent. FARADAY note le sens de ces courants induits par rapport au courant inducteur.

L'approche ou l'éloignement d'un aimant produit les mêmes effets, et le sens des courants induits peut être prédéterminé.

Il essaye alors d'expliquer l'expérience d'ARAGO de 1824 ; une aiguille aimantée arrive très rapidement au repos quand elle oscille au-dessus d'un disque d'un métal non magnétique. Et si l'on fait tourner le disque, l'aiguille aimantée le suit dans son mouvement comme s'il existait un lien entre eux. ARAGO, AMPÈRE, POISSON et d'autres avaient étudié la question. Le phénomène gardait son mystère.

Le 28 octobre 1831, FARADAY fit tourner un disque de cuivre entre les pôles du grand aimant en fer à cheval de la *Royal Society*. L'axe et le bord du disque communiquent avec un galvanomètre. FARADAY note la production d'un courant quand le disque tourne.

Il explique alors par l'existence de courants induits l'expérience d'ARAGO. Il aurait suffi alors de dire que les courants induits, de quelque origine qu'ils soient, sont toujours de nature à s'opposer à la cause qui les produit et FARADAY aurait ajouté à sa gloire celle de for-

muler la loi la plus générale de l'induction qui devait devenir célèbre sous le nom de *loi de Lenz*.

Mais FARADAY poursuit ses expériences. Le 4 novembre 1831, il découvre qu'un fil de cuivre déplacé sous les pôles de l'aimant donne un courant s'il est relié à un galvanomètre. Le sens du courant change avec le sens du mouvement.

FARADAY s'arrête sur cette expérience.

Il recherche le lien entre l'aimant et le fil. Il ne peut admettre les actions à distance qu'accueillaient volontiers les savants français à culture plus mathématique. Il se montrait en cela le continuateur de NEWTON qui, dans une lettre à BENTLEY écrit ce passage que FARADAY aimait à citer :

« Que la gravité soit innée, inhérente et essentielle à la matière, de « telle façon qu'un corps puisse agir sur un autre à distance, à tra- « vers le vide, sans intermédiaire, est pour moi une absurdité telle « qu'aucun philosophe doué de compréhension ne peut l'admettre. »

Pour FARADAY, il y a autour d'un aimant tout un cortège de lignes de force que matérialise l'expérience bien connue du spectre magnétique. Le milieu est en quelque sorte animé par la présence de l'aimant et, pour FARADAY, la cause des phénomènes doit être recherchée dans des actions réelles se passant dans le milieu.

Quand, beaucoup plus tard, JAMES CLERK MAXWELL eut l'inoubliable gloire de traduire en symboles mathématiques les idées de FARADAY, il montra que les deux méthodes, l'action à distance ou l'action du milieu, conduisaient quantitativement aux mêmes lois d'action. Mais les idées de FARADAY qui attribuait aux lignes de force une existence physique, devaient se montrer d'une particulière fécondité en amenant MAXWELL à établir la théorie électro-magnétique de la lumière. Il lui suffit d'ajouter, en 1864, les données qui étaient insuffisantes en 1846, pour calculer la vitesse de propagation.

FARADAY ne tarda pas à remarquer que, pour réussir la production des courants induits dans un fil se déplaçant en regard d'un pôle d'aimant, il fallait que les *lignes de force fussent coupées*.

Cette remarque lui permit immédiatement de se placer dans les conditions nécessaires pour produire des courants induits par le magnétisme terrestre.

Enfin, il fit une autre expérience en faisant tourner un aimant autour de son axe. Des fils de contact reliaient un pôle de l'aimant et sa partie médiane à un galvanomètre.

Pour FARADAY, le courant induit avait son siège dans l'acier qui se comportait comme s'il était indépendant de son propre magnétisme.

Nous savons aujourd'hui que le phénomène peut aussi bien s'expliquer en admettant que l'aimant tourne en emportant son cortège de lignes de force. Ces lignes sont alors coupées par le circuit de liaison au galvanomètre.

Les règles quantitatives de l'induction électromagnétique ne purent êtres formulées que 20 ans plus tard ; c'est en 1851 que FARADAY put dire que le courant induit est proportionnel à la vitesse avec laquelle le conducteur se déplace dans le champ d'un mouvement uniforme et que la quantité d'électricité induite est proportionnelle au nombre de lignes de force coupées (nous disons aujourd'hui proportionnelle à la variation du flux magnétique à travers le circuit induit).

Trois années après la publication de ces découvertes, c'est-à-dire le 20 janvier 1835, FARADAY lit devant la *Royal Society* un mémoire sur « l'Influence par induction d'un courant électrique sur lui-même ». Un choc et une étincelle d'un caractère particulier avaient été observés par un jeune homme du nom de WILLIAM JENKIN qui annonçait une carrière pleine de promesses dans la voie scientifique, mais qui en fut détourné par son propre père. Le fait, porté à la connaissance de FARADAY, le conduisit à la découverte de l'*extra courant*, c'est-à-dire du phénomène d'induction qui se produit dans une bobine unique au moment de la fermeture ou de la coupure du circuit.

Tout était désormais découvert dans les phénomènes essentiels de l'induction. Il suffisait d'y ajouter des notions quantitatives plus nettes sur les qualités magnétiques des matériaux. Il n'y a pas d'exemple d'une suite d'expériences conduites avec une telle sagacité, une telle variété, une telle minutie, une telle précision dans les détails.

FARADAY tourna son activité d'un autre côté.

Sa découverte de l'induction avait laissé dans son esprit un léger doute sur l'identité des électricités et il entreprend, dès le mois d'août 1832, des expériences sur ce sujet de l'identité des courants induits, des courants voltaïques et des courants donnés par les machines à frottement, cette identité étant démontrée par les actions chimiques et par l'action sur l'aiguille aimantée (mémoires lus à la *Royal Society* les 10 et 17 janvier 1831.

En 1833 et 1834, il établit les lois de la décomposition électrochimique, travail considérable qui suffirait à lui seul à établir la gloire d'un savant. Il montre que la conduction des corps composés liquides et la décomposition sont deux faits connexes. Il établit les lois quantitatives des phénomènes. C'est dans ces mémoires qu'apparaissent pour la première fois les mots *élcctrolyse*, *électrolyte*, *électrodes*, au-

jourd'hui classiques. Il émet l'hypothèse de la dissociation des molécules en deux *ions* transportant en sens contraire des charges électriques égales et opposées. C'est encore la conception actuelle. Toute l'industrie électrochimique moderne, si importante, est tributaire de ces travaux de Faraday.

Entre temps, il étudie certaines actions catalytiques, du platine spongieux notamment.

Les recherches de Faraday sur l'électrochimie l'amènent à établir la théorie électrochimique de la pile de Volta, tellement opposée à la théorie dite du *contact*, acceptée alors par tout le monde, que Faraday ne put la faire admettre qu'en 1840. Il affirme que puisque le courant électrique peut produire à l'extérieur une décomposition, il faut que des actions chimiques dont le siège est à l'intérieur de la pile lui donnent naissance et en soient l'équivalent. On peut dire que Faraday avait prévu le principe de la conservation de l'énergie.

« La théorie du contact, dit-il, nous conduirait à une *création de* « *puissance* dont on n'a pas d'exemple dans la nature. Nous ne pro- « duisons que des changements dans la forme et l'aspect de cette puis- « sance. »

C'est à cette époque que Faraday entreprit une série d'expériences sur les corps non conducteurs et qui aboutissent à une théorie complète des isolants et à la notion du *pouvoir inducteur spécifique*. C'est au cours de ces recherches que Faraday reprend la bataille contre l'action à distance qui ne peut s'exercer qu'en ligne droite. Si l'on peut établir, ce qu'il fit, que les actions électriques peuvent se manifester suivant des *lignes courbes*, ce ne peut être que de proche en proche, par l'action de particules contiguës du milieu.

Ces formidables travaux de Faraday avaient gravement compromis sa santé et il dut, après quelques avertissements, s'imposer, en 1840, un repos prolongé de quatre années. Il alla les passer en Suisse qui commençait à devenir à la mode pour ses compatriotes, en compagnie de sa femme et de M. et Mme Georges Barnard, son beau-frère et sa belle-sœur.

En 1840, la mémoire seule de Faraday était atteinte. Dix années plus tard, une sorte de paralysie gagnait les muscles des bras, des jambes et de la gorge. Mais jamais ces attaques n'affaiblirent la vigueur et la profondeur de son esprit. Ce n'est qu'à partir de 1863 qu'il dut renoncer à tout travail.

Il semble que ce repos de quatre années ait été favorable à une sorte de repliement de son esprit vers les deux idées dominantes qui l'ont guidé dans tous les travaux, à savoir l'impossibilité de l'action à dis-

tance et l'unité des forces naturelles. Et, dans cette deuxième partie de sa vie, il oriente ses recherches sur les *relations entre le magnétisme et la lumière.*

Des expériences antérieures lui avaient montré qu'un champ électrostatique était sans influence sur un rayon de lumière polarisée.

Il fut plus heureux avec le champ magnétique et, après des centaines et des centaines d'expériences, il établit que lorsqu'un rayon de lumière polarisée se propage dans la direction des lignes de forces magnétiques à travers un verre lourd (silicoborate de plomb), le plan de polarisation tourne d'un certain angle. Cette rotation est nulle quand le champ magnétique est perpendiculaire à la direction du rayon lumineux. Son sens et sa valeur sont liés au sens et à la valeur du champ magnétique.

Le mémoire dans lequel FARADAY annonça cette découverte sous le titre de « magnétisation de la lumière et illumination des lignes de forces magnétiques » provoqua une grosse émotion.

C'est au cours de ces longues recherches que FARADAY fit une découverte qui l'impressionna au point qu'il n'alla pas à la séance de la *Royal Society* où était lu son mémoire sur la magnétisation de la lumière. Il constata qu'une barre de verre lourd se mettait en croix avec la direction du champ magnétique produit par un puissant électro-aimant. C'est le phénomène du diamagnétisme, propriété générale qui appartient à toutes les substances sans exception qui ne sont pas magnétiques à la manière du fer.

Il étudie l'action du champ magnétique sur les cristaux. Il avait été amené à ces nouvelles recherches par la manière de se comporter de certains corps comme le bismuth qui agit tantôt comme une substance magnétique, tantôt comme une substance diamagnétique. FARADAY croit voir là une force nouvelle, qu'il appelle la force magnéto-cristalline. TYNDALL devait montrer plus tard l'inutilité de cette hypothèse et élucider la question.

C'est au cours des recherches sur les relations entre le magnétisme et la lumière que FARADAY fit la connaissance de MAXWELL qui devait, dans un génial effort, apporter à toute son œuvre son magnifique couronnement.

L'œuvre de FARADAY était admirée dans le monde entier. Il fut élu l'un des huit membres étrangers de l'Académie des Sciences et, en 1856, NAPOLÉON III, le fit commandeur de la Légion d'Honneur. Dans sa lettre de remerciements, FARADAY dit qu'il n'est qu'un des maillons de la chaîne qui, espère-t-il, unira toujours la France et l'Angleterre.

Dans son propre pays, on eut toutes les peines du monde à lui faire accepter une pension que lui avait octroyée GUILLAUME IV en 1835. Et plus tard, ce grand homme désintéressé hésita longtemps à accepter l'asile de repos que lui offrit la Reine VICTORIA à Hampton Court.

C'est à Hampton Court qu'il mourut dans l'après-midi du 25 août 1867. La mort paisible l'atteignit dans son fauteuil, dans son cabinet de travail. Il s'était affaibli seulement dans les quinze derniers jours.

Ce fut une grande âme simple. Son génie éclatant ne fut dépassé que par sa valeur morale et son désintéressement.

Traduction des Articles du *Times*

parus le 21 Septembre 1931



Statue de **Faraday** à l'exposition de l'Albert Hall.

Photographie reproduite avec l'autorisation de la " Royal Institution ".

FARADAY

Article de tête

Aujourd'hui, les savants et les ingénieurs électriciens sont rassemblés à Londres pour célébrer le centenaire d'un fait qui, évalué à notre échelle moderne, ne paraîtrait qu'une expérience des plus simples. Il y a un peu plus de cent ans, MICHEL FARADAY travaillant dans son laboratoire de la *Royal Institution*, Albermarle Street, prit un anneau de fer et enroula sur chacune de ses moitiés deux bobines de fils séparées. Il réunit les deux extrémités de l'un des fils à un galvanomètre, celles de l'autre à une batterie de piles et il constata que, quand il établissait ou qu'il coupait le circuit de la bobine reliée à la batterie, le galvanomètre indiquait le passage, dans l'autre bobine, d'un courant instantané.

C'est ainsi que, le 29 août 1831, il démontra que l'électricité était produite par le magnétisme. Cette découverte n'était pas due au hasard. Pendant des années, il avait cherché à produire ce phénomène, mais il avait toujours dû consigner, comme conclusion de ses expériences, ces mots désolants : « aucun résultat ». A cette époque, on portait un intérêt passionné aux relations entre l'électricité et le magnétisme. Dix ou onze ans plus tôt, en Danemark, ŒRSTED avait découvert qu'une aiguille magnétique est influencée par un courant électrique passant dans un fil voisin. Bientôt après, en France, AMPÈRE annonça l'existence d'une action dynamique entre des conducteurs parcourus par des courants électriques et ARAGO découvrit qu'un courant électrique a le pouvoir d'aimanter le fer et l'acier ; en Angleterre, DAVY constatait, indépendamment, le même phénomène.

FARADAY lui-même imagina, en 1821, un ingénieux dispositif grâce auquel un fil, que parcourait un courant voltaïque, entrait en rotation autour d'un aimant permanent ; il réalisa ainsi, en fait, le premier moteur électrique.

Il était donc devenu bien évident que les courants électriques pouvaient produire des effets magnétiques et il semblait à FARADAY, comme du reste à d'autres chercheurs, qu'il devait exister une action réciproque ; que, selon sa propre expression, il devait être possible de

transformer le magnétisme en électricité. La preuve de l'existence d'une telle action lui échappa cependant jusqu'à ce qu'il eût réussi son expérience de l'anneau de fer et c'est alors qu'il commença à comprendre pourquoi ses efforts antérieurs avaient échoué.

Le 30 août, il se posa à lui-même la question de savoir si les effets instantanés qu'il avait observés ne pouvaient pas être attribués à une différence entre les propriétés des métaux, suivant qu'ils sont au repos ou en mouvement. Sept semaines plus tard, il obtenait une réponse concluante, en découvrant qu'il se produisait un courant électrique lorsqu'une barre aimantée se déplaçait dans un sens ou dans l'autre à l'intérieur d'une hélice de fil ; quelques jours plus tard, il réalisait une véritable machine magnéto-électrique en faisant tourner un disque de cuivre entre les pôles du grand électro-aimant en fer à cheval de la *Royal Society*.

Ainsi, en dix jours de brillante expérimentation, répartis sur une période de moins de dix semaines, il avait élucidé les principes essentiels de l'induction électro-magnétique et posé les fondements de cette grande industrie de la construction électrique que nous connaissons aujourd'hui. Sa petite machine électrique était l'avant coureur de la dynamo qui transforme le mouvement mécanique en énergie électrique et son anneau de fer, avec ses deux bobines de fil, était le prototype du transformateur fermé grâce auquel on peut, à volonté, élever ou abaisser la tension, en sorte qu'avec ces deux appareils, il réalisait deux des principaux éléments d'une installation moderne de fourniture d'énergie. Un troisième élément, le moteur électrique, qui transforme à nouveau l'énergie électrique en mouvement mécanique, avait été inventé par lui dix années auparavant.

Si Faraday et nul autre après lui, n'avait découvert l'induction électromagnétique, le monde d'aujourd'hui aurait pu connaître quelques applications banales de l'électricité, telles que les sonneries électriques et les lampes de poche, pour lesquelles suffit le faible courant des piles, mais nous n'aurions connu aucune des applications des courants forts produits par les machines électromagnétiques, ni la diffusion de l'éclairage électrique, ni la traction électrique, ni la commande électrique des ateliers, ni les fours électriques, ni la grande industrie électrochimique.

Evaluée au point de vue purement utilitaire, l'œuvre que nous commémorons cette semaine peut donc être reconnue comme son œuvre maîtresse, mais on peut douter qu'il se fût contenté de la voir apprécier au seul critère des applications pratiques, qu'il était pourtant très

loin de dédaigner ; la satisfaction qu'il aurait éprouvée à connaître les résultats matériels tirés de ses expériences centenaires peut se déduire de l'exclamation qu'il poussa, dit-on, quand on lui montra une lampe électrique : « Je vous ai donné un bébé : vous me rendez un géant ».

Mais le but constant de sa vie fut la poursuite de la vérité scientifique pour elle-même, le désir d'arracher à la nature ses secrets et de *rerum cognoscere causas.*

Il fut vraiment un prince parmi les expérimentateurs ; manipulateur expert, capable de réaliser des merveilles avec un outillage simple, sinon grossier, c'était à très juste titre qu'il aimait à se dire expérimentateur scientifique ; comme LORD RUTHERFORD le remarque dans un des articles que nous publions ici, il ne cherchait pas seulement à accumuler des faits nouveaux, mais aussi à se rendre compte des lois physiques dissimulées derrière les phénomènes qu'il observait.

L'ampleur de son champ d'investigation était surprenante, s'étendant à toute la gamme des sciences physiques et il n'en est guère à laquelle il n'ait apporté une contribution importante. Quelques-unes de ces sciences ont été établies par lui sur des fondements si solides que les chercheurs nouveaux n'ont eu qu'à en développer la superstructure ; sur d'autres on trouve, dans ses notes, des indications ou des suggestions de découvertes ou d'idées qui, longtemps seulement après sa mort, prirent une place prédominante dans les théories scientifiques ; telles, par exemple, ses recherches, qui furent si près d'aboutir, sur la nature atomique de l'électricité.

Son œuvre fut entièrement dominée par la conviction de l'unité essentielle de toutes les forces naturelles, par la persuasion que les formes variées sous lesquelles elles se manifestent sont, entre elles, en dépendance si directe et en liaison si étroite qu'elles peuvent être transformées les unes dans les autres.

C'est en cherchant à démontrer la possibilité de convertir le magnétisme en électricité qu'il fut conduit à sa grande découverte de l'induction électromagnétique et sa dernière expérience, qui échoua seulement parce que les appareils dont il disposait n'étaient pas assez délicats, avait pour but de trouver une nouvelle relation complétant celle, qu'il avait découverte, 17 ans auparavant, entre le magnétisme et la lumière.

De nos jours, où les mathématiques tiennent une si grande place dans les recherches physiques, il peut sembler étrange qu'un chercheur aussi doué que FARADAY n'ait jamais employé un symbole ma-

thématique et, de fait, il avait coutume de déplorer « l'insuffisance de ses connaissances mathématiques ».

Il avait cependant l'esprit mathématique à un degré très élevé et ce fut en transposant ses conceptions sous une forme mathématique que son grand interprète, CLERK MAXWELL, donna au monde ses équations que Sir J. J. THOMSON déclare être les plus importantes de la physique.

Mais, si l'on cherche à découvrir d'où pouvait lui venir cette intelligence et ce sens si merveilleux des phénomènes physiques, on ne peut trouver aucune réponse satisfaisante : tout ce que l'on peut dire, c'est que l'on naît avec le génie, mais qu'on ne l'acquiert pas.

L'hérédité ne nous fournit aucune explication, car aussi loin qu'on puisse remonter, ses ancêtres étaient des gens très ordinaires qui ne manifestèrent aucune prééminence intellectuelle susceptible d'être transmise à leurs descendants.

Aucune autre explication ne peut être trouvée dans son éducation ou dans son instruction. Il a dit un jour de lui-même qu'il n'était « pas instruit au sens usuel du mot » et c'est exact en ce sens qu'il devait peu à l'instruction scolaire courante.

Il quitta l'école à l'âge de 13 ans et, comme il arrive souvent aux hommes de génie, il s'instruisit lui-même en lisant tout ce qui lui passait par les mains pendant son apprentissage de relieur et en assistant aux conférences scientifiques toutes les fois qu'il le pouvait.

Il n'avait pas fait d'humanités, qui étaient alors considérées comme indispensables à une éducation libérale ; (on peut rappeler que quand la *British Association* se réunit à Oxford en 1832, on entendit formuler dans certains milieux la plainte que l'Université s'était déshonorée en admettant un « salmigondis de savants » et en conférant des titres honoraires à quatre d'entre eux, dont il était ; c'est peut-être en partie pour cela qu'il avait, sur les avantages de l'enseignement scientifique dans les écoles, des opinions fort en avance sur son époque).

Sa propre situation comme professeur est assez difficile à définir. Il se montrait infatigable quand il s'agissait de faire des conférences à la *Royal Institution*, où il inaugura les fameux entretiens du vendredi soir et les conférences de Noël, mises à la portée d'un jeune auditoire. Celles-ci ont maintenant derrière elles plus d'un siècle d'histoire. Tous ceux qui l'entendirent et tous les conférenciers, ses contemporains, s'accordent à reconnaître qu'il y était hors de pair.

D'autre part, c'était un chercheur essentiellement individualiste, qui était incapable de faire « travailler pour son compte des étudiants ou des élèves » ; il ne fut jamais chef d'une équipe de disciples en-

thousiastes, inspirés de son esprit magistral et répandant ses méthodes et ses doctrines.

Pour un tel homme, la *Royal Institution* constituait un milieu particulièrement propre à développer son génie. Elle a toujours été un établissement où les chercheurs originaux peuvent poursuivre leurs recherches au gré de leur inspiration, sans être entravés par la routine d'un cours régulier, ou dérangés par les besognes administratives ; si la *Royal Institution* n'avait rien fait d'autre que de fournir des possibilités à un Faraday (et ses annales contiennent un grand nombre d'autres noms distingués) elle aurait bien mérité et de notre pays et du monde.

MICHEL FARADAY (1791-1867)

UN MODESTE CHERCHEUR DE VÉRITÉ

Le secret de sa grandeur

par Rollo APPLEYARD

MICHEL FARADAY naquit à Londres, le 22 septembre 1791. Il fit sa plus célèbre découverte le 29 août 1831. Il mourut le 25 août 1867.

Si on excepte ISAAC NEWTON, dont les Principia constitueront toujours le plus haut sommet atteint par le génie humain dans le domaine des observations et des mesures, FARADAY est universellement reconnu, du fait de ses recherches, de son enseignement, de l'ardeur et de la noblesse de son caractère, comme hors de pair dans le royaume des sciences naturelles.

Cette année, tout en célébrant ses expériences et en restant saisis d'admiration devant la richesse des développements qui en ont été tirés, il convient de nous rappeler qu'il fut, au sens le plus élevé du terme, un savant, un homme modeste, de foi simple qui, de toutes ses forces, chercha à connaître la vérité et à faire le bien.

Son premier milieu fut la pauvreté ; son instruction première fut extrêmement restreinte. Aucun collège, aucune université ne s'ouvrit devant lui ; il entra dans le monde par le bord le plus âpre.

Du côté paternel, comme du côté maternel, MICHEL était d'une souche de paysans et d'artisans anglais. Son nom apparaît sur le registre de l'église paroissiale de Saint-James, au village de Clapham, dans le Yorkshire, dès 1740, et les FARADAY s'y trouvent associés à la famille des DEAN, du manoir du bois de Clapham. Ce manoir est à près de 5 km de l'église. On y arrive en suivant la route qui mène de la gare de Clapham à Slaidburn, jusqu'à un poteau indicateur, puis, en tournant à droite, vers Bentham.

Le manoir n'existe plus, mais il reste un modeste bâtiment de ferme, encore désigné sous le nom de manoir du bois de Clapham; le petit domaine contient deux bâtiments séparés, l'un, « la Grange d'habitation », l'autre, devenu une salle de culte, la « Filature de coton » ou

« la Filature à bobines » tous deux rattachés jadis, par l'acte civil, à la famille des FARADAY.

Il nous suffit, pour ce qui nous occupe maintenant, de relever que le grand-père de MICHEL, ROBERT FARADAY, né en 1728, épousa en 1756 ELISABETH DEAN du manoir du Bois de Clapham et en eut sept fils : RICHARD, JEAN, JACQUES, ROBERT jeune, THOMAS, BARNABÉ et GUILLAUME. Il eut aussi trois filles : ELISABETH, JEANNE et ANNE.

Parmi les fils, RICHARD est qualifié tour à tour de fermier, d'aubergiste, de couvreur et d'épicier.

JEAN, de fermier se fit tisserand; JACQUES resta toujours forgeron.

ROBERT fils fut successivement tailleur et emballeur dans une filature de lin.

THOMAS et BARNABÉ restèrent cordonniers. GUILLAUME mourut jeune. En 1800, les filles étaient toutes célibataires.

Le père de MICHEL, un des fils du vieux ROBERT, JACQUES le forgeron, épousa, en 1786, MARGARET HASWELL, fille d'un fermier de Mallestang, près de Kirkby Stephen, dans le Westmorland.

Il est des gens à Clapham, dans le Yorkshire, qui aimeraient à réclamer MICHEL pour citoyen de leur joli village; mais il est trop bien établi que JACQUES et MARGUERITE vinrent dans le Sud et fondèrent un foyer près de l'aboutissement du chemin de Walworth à la butte de Newington, à Londres, non loin de la vieille église, aujourd'hui démolie, de Sainte-Marie-Newington. L'emplacement de la forge était proche de la rue de la Croix, devenue aujourd'hui la rue du Drapier; mais la maison où est né FARADAY n'a pas encore été identifiée.

Pour un observateur occasionnel d'aujourd'hui, le choix de cet emplacement, à la jonction de deux grandes routes pénétrant dans Londres en venant du Sud, était tout ce que pouvait désirer un forgeron; toutefois, il régnait une grande misère dans la localité; aussi est-il certain que les espoirs conçus par la famille FARADAY dans leur maison du Yorkshire avaient été quelque peu déçus ; les résultats de leur industrie avaient été désappointants.

En 1796, JACQUES et MARGUERITE avaient une petite famille de trois enfants ; ELISABETH, née en 1787, ROBERT en 1788 et MICHEL en 1791.

Avec ce précieux fardeau, ils se retirèrent sur l'autre rive de la Tamise, dans un coin obscur de Jacob's Well-mews, près de Manchester Square.

Le père était malade et l'on peut s'imaginer leurs conditions d'existence. En 1802, naquit le 4e enfant, MARGUERITE.

Autant qu'on peut s'en rendre compte, FARADAY s'initia, dans un externat local, aux éléments de lecture, d'écriture et d'arithmétique.

A 13 ans, il obtint une place de porteur de journaux chez le libraire RIEBAU, au n° 2 de la rue Blandford, à Marylebone.

Pour nous renseigner sur les détails de la vie de MICHEL au cours de cette première période de sa carrière, nous ne pouvons recourir à une meilleure autorité qu'à celle de BENCE JONES qui, en 1870, publia « la vie et la correspondance de FARADAY ». La période de 1850 à 1867 a été contée par TYNDALL qui a fait revivre devant nous FARADAY comme auteur de découvertes. A certains égards, on prend de lui une connaissance plus intime dans le « MICHEL FARADAY » du docteur J. H. GLADSTONE. Les biographies de quelques savants de ses amis nous donnent sur lui des détails personnels.

L'historique le plus précieux de ses travaux scientifiques est son œuvre immortelle : « Experimental Researches » à laquelle il faut ajouter ses journaux, ses livres de notes, ses livres généraux, sa correspondance, recueillis, pour la plupart, par la bibliothèque de la *Royal Institution* et par celle *de l'Institution of Electrical Engineers.*

On peut saisir aussi quelques aspects de son histoire en feuilletant les journaux, comme le *Times*, le *Punch*, l'*Illustrated London News* et le *Saint Paul's Magazine*, d'il y a 60 à 100 ans.

La famille du grand-père de MICHEL appartenait à la secte religieuse des Sandémaniens, à laquelle MICHEL resta fidèle jusqu'à la fin.

Les Sandémaniens adhéraient scrupuleusement aux doctrines des Glasites; un de leurs dogmes était que la Bible n'avait pas été écrite pour enseigner les sciences à l'humanité. Ils faisaient preuve d'une grande force de caractère et ils considéraient comme le devoir commun de leur secte, de soutenir tous ses membres. On trouve, dans le Dictionnaire de biographie nationale, un document instructif sur leur compte. Les parents de MICHEL inculquèrent à leur fils des principes élevés et virils.

Après que FARADAY eut accompli une année d'essai comme porteur de journaux, son maître découvrit ses qualités et, le 7 octobre 1805, il l'engagea comme apprenti, sans prime et pour 7 ans, dans son commerce de relieur-libraire. A la fin de son apprentissage, il entra chez un nouveau maître, comme relieur à la journée, mais le jeune homme commençait à se troubler sous le charme des sciences naturelles qui s'était emparé de lui.

La lecture des livres qu'il avait à relier et à vendre l'attira vers l'étude de la chimie et de l'électricité et il commença à faire des expériences.

En 1810 et 1811, son frère ROBERT l'aida à payer 1 shilling par se-

maine pour suivre des conférences faites sur ces matières au n° 53 de Dorset-Court, Fleet-Street.

Un des amis de MICHEL lui donna aussi quelques leçons de dessin et de perspective. En outre, en février, mars et avril 1812, un des clients de la librairie l'emmena aux conférences de Sir HUMPHRY DAVY à la *Royal Institution*, dans Albermarle Street. La suite de l'histoire est bien connue : il sollicita une audience de Sir HUMPHRY et lui présenta, proprement écrites et reliées, les notes prises à ses quatre conférences. Le résultat fut que, le 8 mars 1813, il fut nommé préparateur au Laboratoire de la *Royal Institution*. Il recevait 30 francs par semaine et avait à sa disposition deux pièces sous les toits. Il entreprit dès lors des études personnelles. Il s'appliqua à la littérature, à la musique, à la diction, en somme à tout ce qui pouvait faire de lui un homme distingué. Il s'était imposé un programme rigoureux de formation autodidacte ; mais les circonstances vinrent modifier ses projets.

En 1813, Sir HUMPHRY DAVY lui demanda de l'accompagner dans un voyage à travers l'Europe. Lady DAVY et sa femme de chambre devaient compléter le groupe et tous devaient voyager sous la protection d'un sauf conduit dû à la magnanimité, ou à la sagacité, de NAPOLÉON.

Ce devait être un voyage d'enquête scientifique en France, en Italie, en Sicile et en Allemagne. Ils emporteraient avec eux les appareils nécessaires à leurs recherches.

Ils devaient visiter l'Auvergne pour étudier ses volcans éteints et Montpellier pour y faire certaines recherches sur l'iode.

Ces quatre personnes étrangement assorties, DAVY, Lady DAVY, FARADAY et la femme de chambre, s'embarquèrent à Plymouth pour Morlaix, le 17 octobre 1813, sur un voilier « parlementaire » qui jaugeait probablement de 40 à 50 tonnes.

A leur arrivée en France, ils chargèrent leurs effets et leurs appareils dans leur calèche de voyage et se dirigèrent sur Paris.

Les Français les accueillirent généreusement et délivrèrent à FARADAY un passeport où il se voyait décrit comme possesseur « d'un menton rond, d'une barbe brune, d'une grande bouche et d'un grand nez. »

Si l'on considère quel était l'état de l'Europe à cette époque, ce voyage constituait un courageux exploit. Les conséquences en furent importantes, non seulement en raison des recherches poursuivies par DAVY, mais parce que ce voyage mit DAVY et FARADAY à même de constater directement les progrès effectués sur le continent.

Un an plus tard, DAVY racontait avoir, au cours de ce voyage, passé des Pyrénées aux Alpes, traversé deux fois ces dernières, visité des volcans éteints, rencontré AMPÈRE et GAY-LUSSAC, BERTHOLLET, CUVIER, HUMBOLDT, CHEVREUL, d'autres savants encore, passé à Rome, à Florence, à Naples, à Milan, conversé avec VOLTA et DE LA RIVE.

MICHEL souffrit d'abord de la situation servile dans laquelle il se trouvait accidentellement placé. Un autre élément de trouble fut, à son retour à Londres, le risque qu'il courut d'être désigné pour entreprendre, à Naples, des recherches sur le déploiement des papyrus d'Herculanum.

Cette période d'incertitude eut toutefois une fin ; en 1815, il devint adjoint au Laboratoire et aux collections de minéralogie en même temps que préposé aux appareils.

Tout ce qu'il apprit de DAVY et d'autres professeurs lui fit faire des progrès si rapides que, vers 1819, il prenait des élèves et se consacrait entièrement aux travaux de laboratoire et aux réunions scientifiques.

Sa formation d'autodidacte comprenait « la composition, le style, la diction, la lecture, l'éloquence, la grammaire, la prononciation, l'art de l'exposition. »

En même temps, il ne négligeait jamais ses pratiques religieuses et il conservait l'habitude, quelque pressantes que fussent ses obligations d'Albermarle Street, de se rendre le samedi chez sa mère et ses sœurs.

Heureusement, il ne sacrifia jamais non plus la tâche qu'il s'était imposée de noter sur ses agendas, livres de notes et autres, les résultats auxquels il parvenait et ses observations importantes. Il étudiait avec soin ce que les autres publiaient sur les progrès accomplis en physique et en chimie et, dans ce domaine comme dans tous ceux auxquels il appliqua son intelligence, il offre un modèle de premier ordre. Il avait, toutefois, le cœur joyeux : il aimait à chanter, à rire et à jouer, quand il le pouvait. On put le voir quelquefois rouler indéfiniment dans l'amphithéâtre de la *Royal Institution* sur un vélocipède qui était alors « une nouveauté ».

En 1820, ses idées sur la vie subirent une modification : il y avait dans l'église sandemanienne un ancien, M. BARNARD, orfèvre dans Paternoster-row, dont la troisième fille, SARAH, par raisonnement ou autrement, guérit MICHEL d'une erreur sur la nature des affections humaines. Dès qu'elle apprit cela, Mme BARNARD emmena SARAH à Margate ; MICHEL les suivit et bien que son cerveau fût, comme il le dit, « encombré de stupidités telles que les chlorures, les essais, les huiles, DAVY, l'acier et cinquante autres songes creux », il se convainquit que SARAH avait raison et ils s'épousèrent le 12 juin 1821.

Davy lui rendit le service de le faire loger avec sa femme à la *Royal Institution* où Michel venait d'être nommé Inspecteur des bâtiments et du Laboratoire.

Depuis cette époque jusqu'à la fin de leur vie, leur roman fut la simple histoire de deux époux fidèles. Leurs moments les plus heureux étaient ceux qu'ils passaient à dessiner ensemble dans les chemins de campagne, ou à s'aventurer discrètement au parterre d'un théâtre. Parfois, ils allaient à l'Opéra, ou se joignaient à un joyeux pique-nique au bord de l'eau. Leur cercle finit par s'étendre bien au delà de ses confrères en science : il engloba des musiciens et des artistes parmi les plus célèbres tels que Garcia, la Malibran, Stanfield, Turner, Westall et Landseer. Chez Faraday, il n'y avait rien de pédant ni d'ennuyeux. S'il y avait un nuage dans sa vie, c'était de n'avoir pas d'enfants pour partager avec lui la lumière du soleil et contempler les arcs en ciel.

Son succès fut le résultat d'un intense effort soutenu pendant de longues années. Il fut prompt à évaluer l'étendue du territoire inexploré que Henry Cavendish, Thomas Young, et d'autres avaient délimité, et au travers duquel Volta, Ampère, Gauss et Oersted avaient frayé des voies. De plus, il était chimiste autant que physicien et ce qui lui manquait en science mathématique était compensé par le libre jeu de sa puissante imagination, freinée et guidée par son esprit logique et par son profond respect de la vérité et de la justice. De même que son père battait l'enclume de son marteau, il forgeait les faits des sciences naturelles et les forçait à se coordonner. L'effort qu'il s'imposait était considérable, il l'était même trop car, vers 1835, alors que, comme savant et comme conférencier, il jouissait d'une renommée mondiale et de l'estime universelle, sa santé commença à décliner. En 1841, il chercha à retrouver des forces en voyageant en Suisse mais, à son retour en Angleterre, il se sentait déprimé et sa mémoire baissa un peu. Il lutta virilement contre ces symptômes redoutables, et il s'appliqua, avec toute l'ardeur dont il était capable, à de nouvelles recherches ; mais il finit par se paralyser et, le 25 août 1867, il s'enfonça, comme nous le dit Tyndall, dans le suprême repos.

Un des traits caractéristiques de Faraday est le soin extrême qu'il apporta à préciser ses expériences du 29 août 1831 et cela afin de rendre pleine justice aux autres savants. Ce n'est pas lui qui découvrit l'induction électromagnétique. Suivant ses propres termes (p. 2,

vol. 1 des Experimental Researches), il était guidé par « l'espoir de tirer l'électricité du magnétisme ordinaire ».

Il savait :

1° qu'en 1819 ou au début de 1820, Oersted avait démontré qu'un courant électrique dévie une aiguille aimantée.

2° que le 18 septembre 1820, Ampère, prenant la suite d'Oersted, avait démontré que deux courants électriques, passant dans des con-

3° que le 20 septembre 1820, Arago avait aimanté des aiguilles d'acier à l'intérieur d'une hélice de fil parcouru par un courant.

ducteurs voisins, exercent l'un sur l'autre des actions mécaniques.

4° que le 21 mai 1821, Sir Humphry Davy avait démontré, et peut-être n'était-ce pas pour la première fois, qu'un arc électrique peut être dévié par un aimant.

5° que le 22 novembre 1824, Arago avait observé l'amortissement des oscillations d'une aiguille aimantée, placée à peu de distance au-dessus d'une surface métallique, telle qu'une feuille de cuivre.

Le premier volume des « Experimental researches in electricity » de Faraday, contient la revue de ces travaux des autres, établie par lui en 1831, avec cette remarque « qu'il paraissait peu probable que ce fussent là les seuls effets d'induction pouvant être produits par les courants ».

Là encore, il note ce résultat, trouvé par lui-même, (p. 14), que « l'emploi du fer augmente sensiblement l'induction électromagnétique » et il peut ajouter (p. 15) : « les diverses expériences relatées ici prouvent, je pense, d'une manière très complète, que l'électricité peut être produite par le magnétisme ordinaire ».

Cent ans se sont écoulés depuis qu'a été publié ce merveilleux résultat.

Sommes-nous certains de la voie qu'il a suivie pour réaliser l'expérience qui, pour la première fois, révéla ce phénomène ?

Tyndall, à la page 21 de « Faraday as a discoverer » nous dit « qu'il commença ses expériences sur l'induction des courants électriques en constituant une hélice de deux fils isolés, enroulés côte à côte autour d'un même cylindre de bois. »

Faraday lui-même, à la page 2 du volume I de ses « Experimental Researches », commence la description de son appareil en expliquant comment il employa une hélice de fil de cuivre enroulé sur un cylindre de bois. Ceci justifie probablement la version de Tyndall, mais Faraday a-t-il vraiment réussi d'abord son expérience avec un noyau de bois ? ou était-ce un noyau de fer ?

Le Journal manuscrit de FARADAY, qui constitue l'autorité suprême, enregistre, à la date du 29 août 1831, la première expérience réussie ; il dépeint et décrit clairement l'anneau de fer qui constituait le noyau de l'hélice de fil.

FARADAY avait décidé de consacrer à cette expérience toute sa science et toutes ses ressources.

Savant, il connaissait la propriété magnétique du fer ; fils de forgeron, il savait fabriquer un anneau de fer.

Son génie lui inspira l'idée que l'emploi de ce dispositif augmenterait ses chances de succès. Pourquoi donc ne l'a-t-il pas noté, dans son compte rendu imprimé, comme la caractéristique de sa première expérience ? L'explication doit être cherchée dans le court paragraphe de la page 2 du volume I où il dit : « Ces résultats, je me propose de les exposer, non comme je les ai obtenus, mais de manière à donner, de l'ensemble, la vue la plus concise. »

L'activité de FARADAY dans son laboratoire, son habileté d'expérimentateur, son éloquence de conférencier, la bonne confraternité qu'il réussit à établir parmi les hommes de science, le renom de ses découvertes, tout cela est bien connu.

Il convient d'y ajouter son influence dans la réforme du système d'éducation, ses plaidoyers pour l'introduction, dans les écoles publiques, de l'enseignement des sciences naturelles, son insistance à faire consacrer la situation des pionniers du progrès scientifique et, par-dessus tout, son dévouement à la patrie.

Il était conseiller scientifique de *Trinity House* et il travailla constamment à améliorer l'éclairage des phares. Il refusa une chaire de chimie à l'*Université de Londres*, mais il entra dans son conseil.

Il accepta, toutefois, de faire des conférences de Chimie à l'*Académie Royale Militaire* de Woolwich. La définition personnelle qu'il tenait à donner de son attitude, était la suivante : « être toujours prêt à assister le gouvernement, mais sans rétribution ».

Il avait coutume de dire : « J'ai l'honneur et le plaisir de répondre aux demandes de l'Amirauté, de l'Artillerie, de l'Intérieur, des Eaux et Forêts et d'autres départements ministériels. » Les appels que lui adressaient, de Grande-Bretagne et de l'étranger, les correspondants qui avaient besoin de ses conseils, étaient innombrables. Avec tout ce qui lui restait de forces, il cherchait à leur donner une réponse utile.

Quiconque désire étudier la vie de FARADAY sera reconnaissant à son ami irlandais TYNDALL de l'inspiration qu'il a eue de léguer si éloquemment son secret à la postérité : « La beauté et la noblesse d'âme,

écrit-il, s'unissaient en lui pour exclure toute vulgarité et toute bassesse. Ce n'est pas dans le monde qu'il a pris des leçons de distinction; cependant la terre d'Angleterre ne contenait pas de plus parfait gentleman que lui. Sa science ne constituait même pas la moitié de sa grandeur, car elle ne pouvait révéler la splendeur et la délicatesse de son cœur ».

PROGRAMME DES FETES DU CENTENAIRE

L'EXPOSITION DE L'ALBERT HALL (du 22 au 25 septembre 1931).

L'Illumination des monuments.

Londres, au nom du monde scientifique tout entier, apporte un digne tribut d'hommage au génie de MICHEL FARADAY. Les hommes de science d'un grand nombre de pays se sont rassemblés ici pour honorer sa mémoire et ses travaux.

L'exposition de FARADAY, ouverte à l'Albert Hall, nous montre les résultats des miraculeuses inventions qui se sont succédé pendant un siècle remarquable pour les progrès mécaniques ; elles couvrent le monde de leur rayonnement multiforme ; toutes sont issues de la première expérience faite il y a cent ans par FARADAY, pour produire de l'électricité au moyen du magnétisme.

La *British Association*, sous la présidence du général SMUTS, tient, à Londres, au cours de cette période de commémoration, la réunion de son centenaire ; mais la célébration la plus éclatante, du centenaire de la grande découverte de FARADAY, bien qu'elle n'ait pas été réalisée spécialement dans ce but, s'est manifestée depuis le début de septembre devant les yeux de millions de Londoniens.

L'éclairage par projecteurs, que nous avons contemplé avec admiration pendant les trois dernières semaines constitue, pour la plus grande part, un des aspects de l'immense superstructure d'inventions pratiques basées sur les recherches de FARADAY.

Il existe une connexion directe entre le patient travail poursuivi par FARADAY au fond de son laboratoire et ces éblouissants décors nocturnes créés par la concentration de puissants foyers d'éclairage sur les monuments les plus fameux et les plus remarquables de la Métropole.

Appareils et Modèles.

Si l'éclairage par projecteurs est, pour nos yeux, la partie la plus attirante des fêtes du centenaire, l'exposition de l'Albert Hall est en-

core, à un autre point de vue, très impressionnante. Aucune peine n'a été épargnée pour la mettre à la hauteur d'une si grande circonstance.

L'objet de l'exposition entreprise, comme il convenait, par *l'Institution of Electrical Engineers*, avec la collaboration de la *Royal Institution*, est de présenter, côte à côte, d'une part les expériences mêmes de FARADAY, de l'autre les immenses conséquences qui ont été tirées de ses découvertes.

Peut-être la meilleure manière de commencer la visite de l'exposition est-elle de s'arrêter d'abord devant la reproduction exacte et en vraie grandeur du Laboratoire de FARADAY.

Sa reconstitution a été menée à bien par le *Musée Médical historique du Bon accueil*. Cette petite chambre, où l'on peut se représenter en imagination le grand chercheur au travail, constitue en quelque sorte un hall d'introduction à la salle elle-même où l'on voit, groupés dans les stands, les fruits divers tirés de ses travaux.

Au centre de l'exposition, sur le pourtour d'une plate-forme que domine la statue de FARADAY, on a rassemblé une collection de ses reliques personnelles.

Sur le cercle intérieur des stands, entourant la plate-forme centrale, sont exposés ses propres travaux. La *Royal Institution* a ordonné cette partie si intéressante de l'exposition où les visiteurs peuvent voir répéter les expériences réellement faites par l'homme que l'on commémore.

Sur le cercle extérieur des stands qui occupe, par suite, la partie la plus importante de l'exposition, on a disposé tout ce qui peut donner une représentation aussi complète que possible des multiples applications des recherches électriques et chimiques de FARADAY. Tout est du plus haut intérêt, aussi bien pour le spécialiste que pour le profane.

Un grand nombre d'associations industrielles et de corporations diverses ont coopéré à cet effort commémoratif. La production de l'électricité, son transport, sa distribution, ses transformations, ses emplois industriels, commerciaux, domestiques, beaucoup d'autres applications de la science, y figurent sous forme d'appareils et de modèles en fonctionnement.

La chaîne complète des procédés successivement employés, depuis la grossière manutention du charbon, jusqu'aux derniers raffinements de la radiotélégraphie et de la radioffusion, est ainsi présentée avec profusion et de la manière la plus vivante ; les visiteurs peuvent no-

tamment se rendre compte de la manière dont le réseau dit « Grille Nationale » relie entre elles, sous l'impulsion du *Comité Central d'Electricité,* toutes les stations génératrices de Grande-Bretagne.

Dans la section de Radiologie, on constate les derniers progrès réalisés dans la production des rayons X et dans leurs applications ; parmi les maquettes, figure celle du poste régional de radiodiffusion d'Ecosse.

L'éclairage de l'Albert Hall, évoquant encore les liens qui le rattachent à FARADAY, est extrêmement beau et décoratif. Un velum, recouvrant complètement le plafond, est inondé de lumière par les feux de la galerie supérieure (l'exposition n'occupant que le rez-de-chaussée du Hall) et un grand luminaire central de 13 m de haut est suspendu à la voûte.

Des arches lumineuses disposées en cercle et des appliques fixées aux colonnes de la galerie, complètent la décoration.

La British Association

Cette exposition constitue la forme tangible du tribut apporté à la mémoire de FARADAY. Ses travaux sont, en outre, commémorés cette semaine, par les discours de savants venus de tous les pays et en l'honneur desquels un vaste programme de réceptions et de réunions a été organisé par la *Royal Institution.*

La première de ces réunions est celle du 21 septembre à Queens' Hall. Des représentants distingués d'institutions scientifiques des diverses nations du monde y retracent les services que FARADAY a rendus à l'humanité.

Par suite d'une heureuse coïncidence, les réunions de la *British Association* se tiennent à Londres en ce moment et les délégués au Congrès International d'Eclairage, dont la moitié environ sont étrangers, peuvent participer à la célébration du centenaire.

Mercredi après-midi le général SMUTS déclarera officiellement ouverte au public l'Exposition de FARADAY et, dans la soirée, il prononcera son adresse présidentielle à la *British Association,* dans le Hall Central de Westminster.

Le lendemain, les délégués et d'autres invités prendront part à une garden party donnée au *National Physical Laboratory* par son Directeur, Sir JOSEPH PETAVEL et, le soir, à une réception à l'hôtel de la

Royal Society, à Burlington House; les invitations seront faites au nom du Comité et de son Président, Sir FREDERIK GOWLAND HOPKINS.

Vendredi, les délégués seront conviés, avec d'autres invités, à un banquet offert par le Gouvernement Royal à Dorchester Hôtel, Park Lane, banquet que M. MAC DONALD doit présider. C'est alors que se termineront les fêtes les plus intéressantes et les plus significatives qui aient marqué, en Grande-Bretagne, l'histoire de la Science.

LA FORMATION D'UN SAVANT

L'HÉRÉDITÉ ET LE MILIEU

L'Investigation consciencieuse,

par le Professeur Wilhelm Ostwald

Pour comprendre la personnalité tout à fait extraordinaire de Michel Faraday, nous devons étudier les deux éléments constitutifs de toute personnalité, savoir : l'hérédité et le milieu.

Sur le premier, nous ne connaissons que très peu de chose de nature à nous éclairer.

Mais sur le second, nous savons beaucoup.

Effectivement, Faraday a, dans une large mesure, créé son propre milieu et il s'est ainsi donné la possibilité d'utiliser au mieux tous ses caractères héréditaires.

Les parents de Faraday appartenaient aux classes les plus humbles de la population. Rien ne révèle, dans l'espèce, contrairement à ce que l'on observe souvent, que le père du grand homme se soit nettement élevé au-dessus du milieu où il était né.

Faraday père était un homme tranquille, qui n'avait guère réussi dans la lutte économique pour l'existence et qui avait satisfait ses besoins religieux en adhérant à la petite communauté religieuse des Sandémaniens, laquelle cherchait à appliquer, entre ses membres, le christianisme intégral.

Son illustre fils resta membre de cette communauté et accepta d'y remplir un office. Entre ses idées religieuses, qu'il regardait comme strictement personnelles, (ainsi il ne permit jamais à sa femme d'y prendre aucune part) et ses idées scientifiques, il avait élevé au-dedans de lui-même une cloison impénétrable excluant entre elles toute relation et, jusqu'à la fin de sa vie, il ne modifia rien à cette manière d'être.

La mère de Faraday nous est représentée comme une ménagère laborieuse à qui aucune tâche ne semblait trop lourde pour le bien de

son mari ou de ses enfants. D'après ce que l'on sait d'elle, aucun sujet intellectuel ne l'a jamais intéressée.

De même, ni les frères ni les sœurs de Faraday ne se sont élevés au-dessus du modeste niveau de leur petit monde. Un des frères, qui se fit plombier, mourut jeune d'un accident. Il n'y a rien à rapporter au sujet de ses deux sœurs.

Il semble donc que nous ayons affaire ici à un de ces cas de variation spontanée et brusque que de Vries a si complètement étudiés et auxquels il a donné le nom de « mutation ». Malheureusement, le facteur le plus important manque dans le cas présent, soit la non transmissibilité du nouveau caractère acquis, car Michel Faraday n'eut pas de postérité. Nous devons donc nous contenter d'une simple hypothèse.

En ce qui concerne l'influence du milieu sur le développement intellectuel de Faraday, les circonstances étaient telles qu'il eut à pourvoir lui-même aux nécessités de son existence. Ses efforts eurent pour buts, dès le début et simultanément, sa propre instruction et les réalisations pratiques.

Guidé par le même instinct qui dirige un caneton vers l'eau, il chercha d'abord à pénétrer dans cet océan de connaissances universelles qu'est le monde des livres ; devenu apprenti relieur, il pouvait lire les ouvrages avant de les relier. Son attrait pour les réalisations pratiques le préserva de devenir un simple puits de documents, un rat de bibliothèque. Il entreprit, avec ses très maigres ressources, de mettre en pratique les notions qu'il avait trouvées dans les « Conversations sur la Chimie » de l'excellente Mme Marcet et dans l'article « Electricité » de « l'Encyclopédie Britannique » et bien souvent il y réussit ; sa méthode expérimentale resta toujours identique à ce qu'elle avait été dès cette époque modeste de sa jeunesse.

Il analysait toujours les problèmes mentalement jusqu'à ce qu'il fût à même de les résoudre par les moyens les plus simples. Quand Helmholtz vint le voir vers la fin de sa vie et visita son laboratoire, il s'étonna du petit nombre de fils de cuivre et de barres de fer qui lui avaient suffi pour réaliser ses découvertes les plus fécondes.

Perfectionnement mutuel.

En dehors de ce que lui apprenaient les livres, Faraday s'instruisait aux conférences du soir d'un M. Tatum pour lesquelles son frère lui payait ses entrées de temps à autre.

Il inscrivait tout ce qui l'avait frappé, et il intitula son cahier de notes : « The Philosophical Miscellany ».

Avec quelques jeunes gens de son âge et de même tendance d'esprit, il fonda une association d'instruction mutuelle supérieure, à laquelle il fit des conférences.

Il attachait la plus grande importance à acquérir une grande facilité de parole et de rédaction et ses fameuses conférences du vendredi soir à la *Royal Institution* montrèrent amplement à quel degré son ambition s'était réalisée..

L'événement décisif de sa vie se produisit en 1812, alors qu'il avait 21 ans.

On lui procura quelques entrées aux Conférences de Sir HUMPHRY DAVY à la *Royal Institution;* c'étaient les dernières que fit DAVY. FARADAY en reçut une profonde impression et son désir de consacrer sa vie à la science devint irrésistible. Il nota soigneusement ce qu'il avait entendu, relia son manuscrit en un volume in quarto et l'envoya à DAVY en lui demandant un emploi dans son Laboratoire.

DAVY fit bon accueil à sa requête et l'engagea en mars 1813. C'est ainsi que FARADAY fut introduit dans le milieu où il devait passer le reste de son existence.

Une autre bonne fortune lui échut 6 mois plus tard. DAVY avait conçu le projet d'un long voyage en France, en Suisse, en Italie et en d'autres pays. Mais tout faillit échouer au dernier moment, en raison de la défection du courrier qui devait l'accompagner. A la demande de DAVY, FARADAY accepta de remplir cette fonction qui comportait tous les services, depuis ceux de secrétaire jusqu'à ceux de domestique personnel, et il eut ainsi l'occasion de faire à l'étranger la connaissance de la plupart des chercheurs scientifiques éminents de son temps.

Le premier travail personnel de FARADAY était du domaine de la chimie. Ce travail lui valut l'attention et le respect de ses contemporains, mais il n'avait rien de révolutionnaire. Ce fut quand, à l'âge de 30 ans, il revint à l'électricité, ce premier amour scientifique de sa jeunesse, qu'il obtint les résultats les plus frappants et les plus importants.

Ce fut une influence étrangère qui l'inspira.

Il avait entrepris d'exposer, dans le Quarterly Journal de la *Royal Institution*, les relations connues à cette époque entre l'électricité et le magnétisme.

En chercheur consciencieux, il répétait toutes les expériences qu'il voulait décrire et, ce faisant, s'inspirant d'une observation pénétrante de WOLLASTON, il découvrit la rotation d'un courant autour d'un aimant ainsi que le phénomène inverse.

Approfondissant encore ces problèmes et bien qu'interrompu plus d'une fois par ses travaux de chimie, il résolut d'explorer méthodiquement le domaine entier de l'électricité pour rechercher les formes multiples de sa transformation en d'autres forces naturelles.

Ce travail donna le jour aux fameuses « Researches on electricity » qu'il publia dans les « Philosophical Transactions » de la *Royal Society*, de 1832 à 1850 ; il y relata en nombre presque indéfini, les découvertes les plus fécondes, depuis la loi fondamentale de l'électrolyse qui porte son nom, jusqu'à la théorie des lignes de force qui a reçu, à un degré plus marqué encore, l'empreinte ineffaçable de son génie.

Nous pouvons bien nous demander comment un homme qui n'avait reçu qu'une modeste instruction élémentaire, qui avait été forcé de s'instruire lui-même et n'avait jamais été initié aux secrets des mathématiques supérieures, a pu néanmoins accomplir des découvertes scientifiques de première importance dans un domaine que la pénétration mathématique d'un Ampère n'avait pu qu'aborder.

La réponse est double.

En premier lieu, Faraday avait eu de bonne heure l'intuition que toutes les forces naturelles sont en relations entre elles et peuvent être transformées les unes dans les autres.

Il ne lui fut pas toutefois donné de saisir la loi de la conservation de l'énergie dans toute sa simplicité et sa généralité ; elle fut découverte (par Mayer, en 1842, par Joule en 1843) alors que Faraday avait parcouru la moitié de sa carrière scientifique ; cependant, la généralité des relations entre les forces physiques s'imposait constamment à son esprit. Il entreprit de mettre en évidence toutes leurs combinaisons possibles, entre elles et surtout avec l'électricité. Ainsi la loi de Faraday exprime une relation entre l'électricité et la chimie et sa découverte de la rotation magnétique du plan de polarisation touche aux relations entre l'électricité et la lumière.

Le second des grands auxiliaires de sa pensée, qu'il créa de toutes pièces et qu'il mania avec maîtrise, fut la représentation géométrique des forces, en particulier par les lignes de force.

Ici, il s'agit non pas d'un symbolisme tel que celui employé en algèbre et en analyse mathématique et dans lequel un système de lettres, entièrement hétérogène, représente les grandeurs et les directions, mais bien des conditions réelles d'une existence objective ; car les forces agissent dans l'espace et la matérialisation de leurs directions par les lignes de force de Faraday fournit, dans le cas de l'électricité et du magnétisme, une représentation directe de leur véritable structure.

Cette manière de représenter les méthodes de travail de la Nature était si entièrement nouvelle et elle parut si étrange à ses contemporains qu'ils n'y purent rien comprendre ; il était réservé à un génie de même rang, CLERK MAXWELL, de traduire la nouvelle géométrie de FARADAY dans le langage courant de l'analyse moderne.

Si nous recherchons les origines des grands pionniers des sciences exactes, nous constatons que, jusqu'au début du XIXe siècle, ils sont très souvent issus de parents pauvres, sans éducation et sans distinction. Plus toutefois nous approchons de notre époque et plus s'élève le niveau de la classe d'où ils sortent. FARADAY (né en 1791) et GAUSS (né en 1777), sont parmi les derniers de la première catégorie ; WILLIAM THOMSON (Lord KELVIN) (né en 1822) et HELMHOTZ (né en 1821), qui appartenaient à la génération suivante, étaient fils de professeurs. La cause de cette évolution se trouve dans le développement incessant de la science.

Elle ne peut progresser que par sa région supérieure, limite de l'inexploré et de l'inconnu ; le chercheur doit partir de ses dernières conquêtes pour pouvoir pénétrer dans les domaines où des découvertes restent possibles ; pour explorer l'inconnu, il doit être entièrement familier avec le connu.

Nous devons consacrer quelques mots à l'attitude de FARADAY en face de la loi de la conservation de l'énergie.

Nous connaissons les insurmontables difficultés qu'elle souleva dans son esprit, difficultés dues à la confusion des notions de force et de travail. MAYER eut à lutter avec ces mêmes difficultés, mais il réussit à les surmonter.

Le journal de FARADAY nous apprend que, à l'automne de 1841, il fit un court séjour à Heilbronn, pays natal de MAYER, où il médita sur ces problèmes.

Une nuit, de sa fenêtre, il vit, dans le ciel, un phénomène déconcertant : une étoile paraissait suivre, parmi ses sœurs immobiles, une trajectoire fantaisiste. Le lendemain, on découvrit que c'était la lanterne du gardien de la tour chargé de guetter, au cours de ses rondes, les commencements d'incendie.

Nous pouvons peut-être regarder cette petite histoire comme un symbole, car FARADAY, en dépit des efforts de JOULE et de WILLIAM THOMSON, ne put jamais adopter leurs vues sur la loi de l'énergie et ce fut pour lui une grande humiliation lorsqu'à la fin de sa carrière, les éditeurs des « Philosophical Transactions », qui lui devaient tant, re-

fusèrent d'imprimer un article dans lequel il développait sa manière de voir.

Il prit des dispositions pour le faire paraître ailleurs, mais la postérité ne put, sur ce point, lui donner raison.

Notre admiration pour FARADAY s'accroît en constatant que ses travaux étaient constamment interrompus par son épuisement physique. Lorsqu'il eut terminé les 10 premières séries de ses recherches de quatre années sur l'électricité, il dut s'interrompre pendant 2 ans avant de les reprendre. Il passa ces deux années en Suisse.

Sa constitution n'avait guère souffert, mais il ne pouvait plus concentrer son effort intellectuel et sa mémoire donnait des signes de faiblesse.

Ces symptômes s'atténuèrent peu à peu quand il eut abandonné son laboratoire, mais ils réapparurent sous l'influence du travail, lentement d'abord, puis plus rapidement.

Nous pouvons, aujourd'hui, risquer l'hypothèse que ce n'est pas seulement de surmenage qu'il souffrait, mais aussi d'un empoisonnement mercuriel chronique, dont les symptômes ont été décrits, il y a quelque temps et d'après une expérience personnelle, par le Professeur STOCK ; ces symptômes coïncident dans une large mesure avec ceux de FARADAY, comme le professeur STOCK l'a lui-même noté.

Si nous examinons les dessins dont FARADAY accompagnait ses articles, nous pouvons facilement remarquer quel usage étendu il faisait de coupelles pleines de mercure et ouvertes, pour établir rapidement les connexions électriques. Les vis et les plots de connexion n'avaient pas encore été inventés à cette époque. Souvent, sans aucun doute, un fil glissait hors de la coupe et projetait quelques gouttes de mercure, en sorte que le plancher du laboratoire dut en être bientôt saturé, entretenant une source constante de vapeur mercurielle vénéneuse. La sensibilité au poison est variable; chez FARADAY, elle semble avoir été fort grande.

Il est merveilleux de constater avec quel calme FARADAY fit face au tragique destin qui entravait sa puissance d'invention, celle de ses qualités qu'il considérait comme la plus précieuse pour lui-même et pour l'humanité.

Mais la science, à laquelle il avait dévoué sa vie, lui apportait la consolation de pouvoir considérer son propre cas avec la même objectivité qu'il avait consacrée à scruter si profondément les secrets les plus cachés de la nature.

LABORATOIRE ET PLATE-FORME

L'ENSEIGNEMENT DE LA SCIENCE

Travaux pour le Gouvernement

par le Major C. E. S. Phillips,

Secrétaire de la Royal Institution.

Bien que les ressources financières trop limitées de la *Royal Institution* ne lui aient pas permis, dans les premières années de sa fondation, de rémunérer convenablement ses professeurs, elle leur a toujours offert des facilités exceptionnelles pour poursuivre, entre ses murs, leurs recherches expérimentales.

Cet état de choses, tout en ayant l'avantage d'attirer ceux qui étaient disposés à faire passer la recherche scientifique avant leur profit personnel, accentuait naturellement pour eux la tentation d'entreprendre des travaux supplémentaires en dehors de l'*Institution*.

Il est évident qu'en fait Faraday aurait pu facilement gagner beaucoup d'argent comme ingénieur conseil; mais de tels travaux auraient apporté un trouble considérable dans la série de ses expériences.

En 1827, en déclinant l'offre d'une chaire de chimie à l'*Université* de Londres, il écrivait :

« Je considère comme un devoir de reconnaissance de ma part de faire ce que je peux pour le bien de la *Royal Institution*, dans cette tentative actuellement faite pour l'établir sur des bases solides. »

Il est heureux pour la postérité que ce sens élevé de loyauté l'ait emporté chez lui.

Deux ans plus tard, on le pressentait pour faire une série de conférences de chimie à l'*Académie Militaire* de Woolwich. Grâce à la courtoisie du commandant (Major Général Wagstaff) auquel j'adresse mes plus vifs remerciements, je puis citer, à ce sujet, un document encore inédit :

Le Colonel (depuis Général Sir Charles) Pasley dit, dans un rapport du 25 mai 1829 :

« La dernière fois que j'ai été à la *Royal Institution*, j'ai demandé

à M. FARADAY, qui est certainement et de beaucoup le meilleur conférencier de chimie, s'il pouvait se charger de faire un cours aux cadets de Woolwich ».

Une lettre de FARADAY, se référant aussi à cette demande de conférences et qui est adressée, le 29 juin 1829, au Colonel DRUMMOND (alors Gouverneur de l'*Académie Royale Militaire*) contient le passage suivant :

« Permettez-moi, avant de clore cette lettre, de vous remercier, ainsi que les autres personnes qui ont pu s'occuper de ma nomination, de la bonne opinion qui vous a amené à me proposer. Je considère cette offre comme un grand honneur et je vous prie d'être assuré que je l'apprécie pleinement. J'aurais été heureux de l'accepter ou de la refuser indépendamment de toute considération pécuniaire; mais mon temps est ma seule richesse et celui que je consacrerais aux devoirs de ma nouvelle fonction devrait être pris sur celui que j'aurais, autrement, consacré à mes occupations professionnelles ».

Les arrangements définitifs furent pris en décembre de cette même année et la première conférence paraît avoir été faite, à 11 heures du matin, le mercredi 30 mars 1830. Elle peut être considérée comme le premier service officiellement rendu à l'Etat par FARADAY.

Il continua ses conférences à l'*Académie Royale Militaire* de 1830 à 1849, aux appointements de 5 000 francs par an.

FARADAY était en outre consulté, de temps à autre, par l'Amirauté, par le Ministère des Eaux et Forêts, par le Ministère de l'Intérieur, par le service de l'Artillerie, par le *British Museum*, par la Régie, etc... et, en 1862, appelé à déposer devant la *Commission de l'Enseignement public*, il se fit l'avocat chaleureux de l'enseignement des sciences.

Sur une requête du service des contributions, la *Royal Society* nomma, en 1832, une Commission chargée de définir les caractéristiques de l'alcool étalon. FARADAY était membre de cette commission et, le 12 février 1833, il déposait un rapport recommandant d'adopter, comme étalon d'essai, de l'alcool étendu et non de l'alcool absolu. Cette proposition fut adoptée.

Il faut aussi mentionner que Sir ROBERT PEEL, alors qu'il était premier ministre, désigna Sir CHARLES LYELL et le Professeur FARADAY pour rechercher la cause d'une grave catastrophe minière survenue aux houillères de Haswell, dans le Comté de Durham, le 28 septembre 1844.

Aux tâches ainsi assumées pour le service national, il faut joindre un avis qu'il donna au sujet des préparatifs à prévoir pour faire exploser par l'électricité l'épave du Royal George; en beaucoup d'autres occasions, il rendit des services importants à l'un ou à l'autre des départements ministériels.

L'année 1831, rendue mémorable par sa grande découverte, trouva FARADAY très activement engagé dans un grand nombre de directions.

Ainsi, en plus de ses recherches et travaux divers à la *Royal Institution* et de ses conférences à Woolwich, sa nomination, en 1836, au poste de conseiller scientifique de *Trinity House*, lui fournit une occasion particulière de rendre des services à son pays.

L'expérience pratique acquise par lui dans son laboratoire représentait, dans l'espèce, une valeur immense, et bien qu'aujourd'hui on ne trouve dans les phares que peu de traces de ses travaux, FARADAY exécuta un grand nombre d'essais ayant trait aux progrès successifs qui ont abouti graduellement à l'adoption des dispositifs modernes dans la pratique des phares.

Son premier travail pour *Trinity House* avait pour objet de perfectionner les systèmes de lentilles suggérés à l'origine par FRESNEL ; il donna lieu à nombre d'importantes discussions avec CHANCE, le fameux fabricant d'appareils de Birmingham.

Je désire exprimer mes remerciements au Directeur et aux Confrères de *Trinity House* pour avoir bien voulu me laisser consulter les innombrables articles et rapports faits par FARADAY pendant la période (de près de 30 ans) où il fut en relations officielles avec la corporation de *Trinity*.

On lui posa un grand nombre de questions ; les recherches et les rapports qu'il fit témoignent invariablement du grand soin, de la sincérité, de l'impartialité qu'il apportait à l'accomplissement de ses devoirs. L'expérience qu'il avait déjà acquise dans la fabrication des verres à la *Royal Institution*, en 1825, au cours de quelques essais exécutés à la requête de la *Royal Society* en vue de perfectionner les appareils d'optique, le qualifiait tout spécialement pour donner un avis sur la meilleure qualité de verre à employer dans les lentilles ainsi que sur d'autres questions pratiques.

Les méthodes utilisées dans les phares et qui avaient été généralement établies empiriquement, par à peu près, suivant la seule règle du coup de pouce, furent soumises par FARADAY à un examen scientifique sévère.

De son temps, toutes les lampes étaient munies de mèches alimentées par un réservoir d'huile.

Il compara minutieusement les propriétés des huiles de diverses provenances ; il mesura et photographia les flammes obtenues avec différents types de mèches.



FARADAY dans son laboratoire de chimie en 1852.
(Tableau de Hariet-Moore, propriété de la Royal Institution).
(*Photographie reproduite avec l'autorisation de la Royal Institution*).

Une des plus sérieuses difficultés que l'on rencontrait dans les phares était l'absorption de la lumière par l'eau qui se déposait sur les lentilles. La lanterne elle-même était exposée à se remplir de fumées provenant des lampes. Il inventa une forme simple et efficace de cheminée de ventilation, mise en action par le courant ascendant des gaz chauds de la flamme.

Parmi de nombreux essais, il rendit compte de l'examen des échantillons d'eau potable consommée dans les phares, ainsi que des échantillons de céruse et de minium employés pour la peinture des

charpentes. De nombreux projets de perfectionnements à la forme des lampes, des lentilles, des lanternes, furent soumis à ses expériences et à ses critiques; pour montrer l'attitude prudente qu'il adoptait toujours en des cas semblables, attitude basée sur le sentiment profond de la responsabilité qu'il aurait encourue en exprimant une opinion qui ne fût pas fondée, nous pouvons citer un paragraphe d'un de ses rapports. Ce paragraphe a trait aux propositions faites en 1852 par le Dr Watson pour l'adoption de la lumière électrique dans les phares. Cette invention, mise au point par l'Electric Power Light and Colour Company, de Wandsworth, nécessitait l'emploi de batteries voltaïques pour la fourniture de l'énergie. Vers la fin de son long rapport, Faraday dit :

« Malgré tout mon désir de voir utiliser la lumière électrique dans les phares, je ne puis recommander son adoption dans les circonstances actuelles. Aucun dispositif réalisé par l'homme ne nécessite plus de régularité et de sûreté de service qu'un phare. Il inspire au marin la même confiance qu'une loi de la nature et, quand le soleil se couche, le marin attend, avec la même certitude, l'apparition de sa lumière ».

Faraday vécut cependant assez pour voir introduire pratiquement l'emploi, à cette fin, de la lumière électrique. Il apporta un témoignage important devant la Commission Royale constituée en 1859 pour l'étude des bouées et balises.

Pendant l'année 1857, Holmes avait réalisé la machine magnéto-électrique qui permettait de produire le courant électrique par des moyens mécaniques et dont le fonctionnement reposait, en fait, sur une des découvertes les plus fécondes de Faraday.

Après de nombreuses expériences sur cette invention, la lumière électrique fut mise à l'essai, en décembre 1858, au grand phare de South Foreland, tout en prenant la précaution, comme on le fait encore aujourd'hui, de ménager un système d'éclairage de secours en cas d'accident.

Une machine magnéto-électrique perfectionnée fut aussi construite quelques années plus tard par la Compagnie de l'Alliance, à Paris.

Dans une description détaillée qu'il en a faite, M. Auguste Berlioz écrit :

« L'objet de cette machine est de produire, de recueillir et d'entretenir un courant électrique sensiblement continu et d'employer industriellement l'électricité produite par l'induction magnétique ou par l'influence d'aimants, sur des corps conducteurs passant momentanément dans leur sphère d'action ».

Il continue en disant que l'invention est basée sur le principe découvert par l'immortel FARADAY.

Dans les archives de *Trinity House*, on trouve un long rapport sur cette machine qui constituait évidemment, à beaucoup d'égards, un progrès sur celle conçue par HOLMES.

Dans un phare moderne, on trouve peu de choses que l'on puisse associer directement au nom de FARADAY; mais il ne faut pas oublier que c'est lui qui, par ses découvertes fondamentales sur l'électricité, a permis de réaliser les puissants systèmes modernes de production d'énergie électrique dont dépendent aujourd'hui l'éclat et la sécurité des grands phares côtiers.

Son dernier rapport à *Trinity House* fut reçu en 1865 et, un an plus tard, sa mauvaise santé le forçait à céder sa place à son ami JOHN TYNDALL, qui était aussi professeur à la *Royal Institution*.

Dans une lettre à Lord AUCKLAND, FARADAY a écrit un jour :

« En loyal sujet, je me suis toujours tenu prêt à rendre service au Gouvernement ».

UN ÉTUDIANT EN ÉCRITURE SAINTE

RAISON ET RELIGION

La Bible annotée de Faraday

par H. Marryat

Michel Faraday était un homme profondément religieux. Pour employer ses propres termes, il appartenait à « une secte chrétienne infime et méprisée, connue, si tant est qu'elle le soit, sous le nom de Sandémaniens ». La discipline de cette secte devait être sévère car, lorsque Fafaday manqua une fois, pour se rendre à une invitation à déjeuner obligatoire chez la Reine Victoria, à l'assistance au service du dimanche, qui occupait toute la journée, il fut frappé d'excommunication. Ce traitement ne paraît cependant avoir excité en lui ni colère ni ressentiment, car il continua à assister régulièrement aux offices et, plus tard, il fut admis de nouveau dans la communauté.

Il ne parlait jamais de sa religion, sauf pour décocher une riposte directe à quelqu'un assez hardi pour lui poser une question ; dans ses écrits, il n'y fait allusion que dans quelques passages d'une noble expression, mais conçus en termes généraux. Il disait :

« Il n'entre pas de science dans ma religion », ce qui revenait à proclamer la conviction que, au-dessus et au delà de tout ce que l'homme peut observer ou calculer, il est quelque chose qui doit toujours rester inconcevable.

Les biographes de Faraday nous donnent l'impression que sa vie comportait deux compartiments distincts : l'un, dans lequel sa grande intelligence explorait la nature, l'autre consacré à la religion et où la raison ne pénétrait jamais.

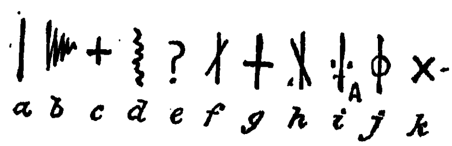
Thompson (Michel Faraday : Sa vie et sa correspondance) va jusqu'à dire : « Faraday ne paraît pas avoir jamais admis la possibilité d'une faute d'origine humaine dans l'impression, l'édition, le collationnement ou l'ordonnancement de la Bible ».

Ceci est difficile à croire ; pour mieux nous éclairer, jetons les yeux sur sa Bible personnelle.

Elle paraît avoir été pour lui une amie de toute la vie. L'usure des pages révèle de fréquentes lectures, mais faites avec tant de soin que ces pages n'ont jamais été salies ni écornées. C'est une édition publiée à Oxford, en 1776 et vendue, brochée, 3 sh 6 pence. C'est sans doute avec amour qu'il l'a reliée lui-même et avec tant d'habileté professionnelle, que les feuillets sont encore aussi solidement fixés qu'au jour où le travail fut terminé.

Les plats en cuir sont intacts ; le nom de FARADAY y est imprimé en or. Les pages de garde portent trois fois sa signature au crayon.

Les notes manuscrites de FARADAY, au nombre de 50, se réfèrent surtout au texte placé en regard ; mais quelques-unes sont caractéristiques, comme, par exemple, le mot « tribut » écrit en face de la référence I. SAMUEL XXV. 5-8 : « DAVID envoie les dix jeunes hommes à



Notations employées par FARADAY dans les marges de sa Bible.

NABAL pour demander des présents », et le mot « MAMMON » en face des passages appropriés.

Toutefois, l'attention est principalement attirée par 2 949 signes proprement crayonnés dans les marges et qui reflètent, d'une manière très intime, les réactions de FARADAY au cours de ses lectures.

Bien que la période de temps au cours de laquelle ils furent tracés ait été considérable, ces signes sont toujours faits suivant un modèle constant et chacun a un sens particulier.

Ils sont reproduits dans la figure ci-contre ; *a* est sa marque personnelle ; *b* la même, accentuée. Le signe marqué *d* est intéressant ; il note des passages n'ayant pas trait à la religion, tels que ceux concernant les tremblements de terre, la foudre, les pierres précieuses, l'emploi des métaux, le martelage et la ciselure de l'or, les poids et mesures, les outils, les récipients en jonc, l'esclavage.

Le fait que FARADAY, contrairement à ce que supposait THOMPSON, n'admettait pas que cette édition fût littéralement parfaite, est abondamment prouvé par les corrections qu'il a apportées aux erreurs d'impression et, s'il acceptait l'infaillibilité de la traduction, ce qui semble peu probable, il n'hésitait pas du moins à améliorer le texte anglais quand il le jugeait nécessaire.

La signification de ses nombreux points d'interrogation est difficile à saisir. Quelques-uns, sans nul doute, indiquent qu'il ne comprend pas ; d'autres peuvent exprimer un doute sur l'exactitude du texte. Un des nombreux passages ainsi marqués est le suivant : Deut. IX 13-14 : « Le Seigneur me parla en disant... laisse-moi seul, pour que je les détruise et que j'efface leur nom de dessous les cieux ».

De longs passages, dans lesquels les noms propres sont soigneusement marqués, paraîtraient indiquer la préparation d'une lecture à haute voix. Les signes *f* à *j*, dans l'ordre ci-dessus indiqué, se rapportent à des textes choisis, pour sujets de sermons, par ses amis WASS, LIGHT, NIXIN, BARNARD et BUCHANAN.

FARADAY prit comme sujet de son premier discours « d'ancien » un texte de MATHIEU, XI 28-30 : « Venez à moi, vous tous qui travaillez et qui êtes chargés et je vous soulagerai. Prenez mon joug sur vos épaules et apprenez de moi que je suis doux et humble de cœur ».

Ce passage, avec ses références correspondantes dans les deux Testaments est annoté, comme le sont aussi les sujets de beaucoup d'autres de ses discours.

Sa jeunesse de caractère, souvent signalée par ses contemporains, se révèle par un signe appuyé en face de certains récits tels que celui du naufrage de saint PAUL, tandis que son extrême mépris de l'argent en lui-même est proclamé par les textes qu'il a soulignés, tels que celui de TIMOTHÉE, VI 10 : « L'amour de l'argent est la source de tous les maux » ou de MARC, VIII 36 : « A quoi sert-il à un homme de gagner l'univers, s'il vient à perdre son âme ? » Son amour de la tolérance et de la charité peut se reconnaître de même aux passages de son choix et la pratique constante de ces vertus tout le long de sa vie est attestée par les faits qu'il souligne.

La raison qui lui a fait noter la loi défendant aux femmes de porter ce qui appartient en propre aux hommes, est moins évidente, à moins que, dès le début de l'ère victorienne, certaines femmes aient eu du goût pour l'attirail masculin. Un passage intéressant, vigoureusement marqué, se trouve dans l'exhortation faite à TIMOTHÉE « d'éviter les bavardages et les discussions sur ce qu'à tort, on appelle la science. »

Le livre des psaumes, qu'il aimait, n'est pas marqué en moins de 237 endroits, notamment au psaume XLVI verset I : « Dieu est notre refuge et notre force », qu'il a récité à ses derniers moments.

Il y a, reliés dans le volume, quatre signets de soie qui n'ont pas été dérangés depuis des années et qui sont peut-être restés à la place même

où il les laissa. Ils marquent : Deut. XXXIII, Job XLII, le commencement des psaumes, et un passage traitant de l'excommunié : 2 Cor. II, sujet qui, rappelons-le, le concernait particulièrement au cours d'une certaine période de sa vie. Nous pouvons croire qu'il puisa de la force dans les mots qu'il a annotés spécialement à ce chapitre : « Nous ferions mieux de lui pardonner et de le réconforter, pour que ce malheureux ne soit pas submergé par un chagrin excessif. »

LE PRINCE DES EXPÉRIMENTATEURS

RECHERCHES AVEC UN OUTILLAGE ÉLÉMENTAIRE

Son sens physique inné

par Lord RUTHERFORD O. M., F. R. S.

Dans l'histoire des sciences physiques de notre pays, trois grands noms se présentent de suite à notre esprit, ceux de NEWTON, de FARADAY et de MAXWELL. Le premier est celui d'un des plus grands mathématiciens de tous les temps ; le dernier, celui d'un mathématicien accompli. Tous deux étaient doués d'un sens physique au-dessus de l'ordinaire. Le troisième, MICHEL FARADAY, n'avait aucune formation mathématique et pas une formule n'apparaît dans ses écrits.

Toutefois, dans le domaine de l'intuition physique et scientifique, il possédait les qualités essentielles du théoricien, sans en avoir la technique et c'était aussi un expérimentateur de premier ordre.

L'histoire de la vie et de l'œuvre de FARADAY a toujours exercé une puissante attraction sur les savants comme sur les profanes, car non seulement elle nous présente un homme d'un beau caractère et d'un haut idéal qui, en partant de la plus humble origine s'est élevé jusqu'à devenir le plus grand auteur des découvertes et le plus grand savant de son époque, mais elle nous fournit aussi un exemple des conséquences extraordinaires qui peuvent être tirées de l'étude patiente des lois de la nature dans la paix du laboratoire, loin de l'agitation des affaires et de la poursuite de buts pratiques.

Peu d'hommes, si même il en existe un seul, ont fait autant pour l'avancement de la science ou pour les ultimes progrès de la race humaine.

FARADAY a été souvent appelé le « Prince des expérimentateurs » et personne ne pourrait nier le remarquable pouvoir qui lui permettait de pénétrer jusqu'au cœur d'une question, grâce à quelques expériences bien combinées et bien exécutées.

C'est un plaisir aujourd'hui de lire les 4 volumes de ses « Collected researches ». On y trouve partout une telle nouveauté de pensées et

de vues jointe à une telle clarté d'exposition, que l'on a peine à se rappeler que la plupart de ces travaux furent écrits il y a près de 100 ans, à une époque où nos connaissances en électricité et en magnétisme étaient encore dans l'enfance.

Faraday était plus qu'un grand expérimentateur : c'était un grand savant. Il cherchait, par ses expériences, non seulement à accumuler de nouveaux faits naturels et à mettre leurs relations en évidence, mais aussi à se rendre compte des lois physiques cachées sous les phénomènes étudiés.

Le désir d'établir une théorie physique et concrète des actions électriques et magnétiques, crut chez lui avec l'âge et l'expérience.

Ses premiers articles, spécialement ceux qui traitent de la chimie, ne contiennent guère que des listes de faits observés ; mais ses préoccupations théoriques apparaissent clairement, pour la première fois, lorsqu'il introduit la notion de l'état électrotonique en vue d'expliquer les phénomènes d'induction électromagnétique. Cette notion se dégagea clairement à la suite d'une splendide série de recherches exécutées en 1837 sur les propriétés diélectriques des isolants, lorsqu'il proposa, pour les expliquer, sa théorie bien connue de la transmission des actions électriques par la polarisation du milieu ; il ajoute avec une modestie caractéristique :

« Finalement, je me permets de dire que je propose ma manière de voir particulière avec quelque hésitation et quelque doute ; je crains qu'elle ne puisse supporter l'épreuve d'une discussion générale ; car, si elle n'est pas exacte, elle ne fera que nuire aux progrès de la science électrique. Elle a longtemps hanté ma pensée, mais j'ai hésité à la publier jusqu'à ce que la persuasion croissante de sa concordance avec tous les faits connus et la manière satisfaisante dont elle relie entre eux des phénomènes qui paraissaient être de catégories très différentes, m'aient engagé à écrire le présent article.

« Jusqu'à présent, je n'aperçois aucune contradiction entre elle et les faits naturels, au contraire, je crois constater qu'elle projette sur ceux-ci beaucoup de lumière ; mes prochains articles seront consacrés à passer en revue les phénomènes de conduction, d'électrolyse, de courant, de magnétisme, de charge, de décharge et quelques autres, à leur appliquer ma théorie et à la confronter avec eux ».

Voyage en Europe

Opposé à l'école mathématique de l'action à distance, Faraday ne

cessait de proclamer l'importance du milieu environnant comme siège des forces électriques et magnétiques.

Il s'en faisait une claire vision grâce à la conception des lignes courbes de forces électriques et magnétiques qui est d'un emploi universel aujourd'hui.

L'importance de ces idées physiques fut pleinement reconnue par MAXWELL, qui eut le génie de les formuler et de les généraliser sous une forme mathématique et qui nous donna, pour la première fois, une théorie satisfaisante des actions électromagnétiques.

Si nous considérons la vie de FARADAY, nous sommes réduits aux hypothèses sur l'influence qu'ont pu exercer sur lui ses relations personnelles avec Sir HUMPHRY DAVY. Tout le monde a, présente à l'esprit, l'histoire suivant laquelle DAVY le prit comme aide de laboratoire à la *Royal Institution* ; sans aucun doute, il reçut de lui ses premières leçons de manipulations physiques et chimiques et nous savons qu'il l'aida dans de nombreuses recherches et, en particulier, pour l'établissement de la lampe de mines de sûreté. Sir HUMPHRY DAVY était alors un des plus fameux personnages d'Europe. Non seulement c'était un chercheur d'une grande originalité et d'une grande puissance, mais aussi un conférencier éloquent et un admirable écrivain.

FARADAY l'accompagna dans son voyage à travers l'Europe et, grâce à lui, il fit la connaissance de plusieurs grands savants étrangers. L'énergie et l'universalité de DAVY à cette époque, sont bien mises en lumière par les expériences qu'il accomplit avec l'aide de FARADAY pendant son voyage à Paris, à Rome et dans d'autres villes. D'étroites relations avec un homme si original et si énergique, ne purent que faire une impression durable sur un esprit ardent comme était celui de FARADAY et exercer une influence marquée sur son précoce développement.

Il n'est pas nécessaire de parler ici de certaines difficultés qui s'élevèrent plus tard dans leurs rapports personnels. D'après ce que nous connaissons du tempérament de DAVY, ce résultat était presque inévitable, car il est tout naturel que, dans cette première période, il n'ait pu se rendre complètement compte du génie encore latent de son collaborateur.

En lisant les notes de FARADAY, il n'est pas facile de se bien représenter aujourd'hui les conditions dans lesquelles il poursuivait ses

recherches. Sans aucun doute, il disposait d'ingrédients chimiques et de réactifs simples mais, à l'exception d'une balance, il ne possédait, à cette époque, que peu ou point d'appareils de physique.

S'il avait déjà été construit d'assez grands aimants permanents et de petits électro-aimants, il n'existait aucune méthode de mesure du champ magnétique, dont on évaluait la force d'après le poids de fer que l'aimant pouvait porter. En dehors des machines statiques à frottement d'un type simple, les batteries de piles constituaient la seule source de courant électrique et, pour débiter un fort courant, ces batteries devaient être reconstituées chaque jour. On ne disposait d'aucun instrument pour mesurer le courant fourni par la batterie ; on l'évaluait par la méthode très approximative et sommaire consistant à déterminer, par tâtonnements, la longueur de fil de platine que cette batterie pouvait porter à l'incandescence. La loi d'Ohm restait encore à formuler et on n'avait aucune notion claire de la tension et de la résistance.

On pouvait se procurer du fil de cuivre nu, mais, pour l'isoler, il fallait l'envelopper à la main de ficelle ou de calicot.

La longueur du fil employé pour constituer une bobine était toujours soigneusement mentionnée, de même que les dimensions et l'efficacité de la batterie, ces données suffisant à quiconque voulait répéter l'expérience. L'insuffisance des appareils de mesures et de leurs accessoires ne s'opposa pas toutefois à de rapides progrès, tout au moins pour des expériences simples et n'exigeant pas une grande exactitude. Mais lorsque des mesures quantitatives précises devinrent nécessaires, Faraday mit rapidement au point les méthodes qui convenaient.

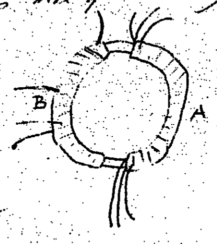
Dans ses expériences sur l'électrolyse, il perfectionna le voltamètre à eau pour mesurer exactement la quantité d'électricité passant dans un circuit ; dans ses recherches sur le magnétisme, il utilisa un type sensible de balance de torsion qui a été très employé par d'autres travailleurs.

En lisant, dans les œuvres de Faraday, la description logique et méthodique des expériences qui le conduisirent à la découverte de l'induction électro-magnétique, plus d'un a dû se demander dans quelles conditions cette découverte avait d'abord été faite. J'ai eu le privilège de lire les bonnes feuilles du Livre de notes de Faraday, que la *Royal Institution* va publier à l'occasion du centenaire. Ce livre contient des documents du plus haut intérêt, non seulement

Aug 29th 1831.

1. Expts on the production of Electricity from Magnetism, &c &c

2. Have had an iron ring made (soft iron), iron round and 7/8 inches thick & ring 6 inches in external diameter. Wound many coils of copper wire round one half, the coils being separated by twine & calico — there were 3 lengths of wire each about 24 feet long and they could be connected as one length or used as separate lengths. By trial with a trough each was insulated from the other. Will call this side of the ring A. On the other side but separated by an interval was wound wire in two pieces together amounting to about 60 feet in length, the direction being as with the former coils; this side call B.



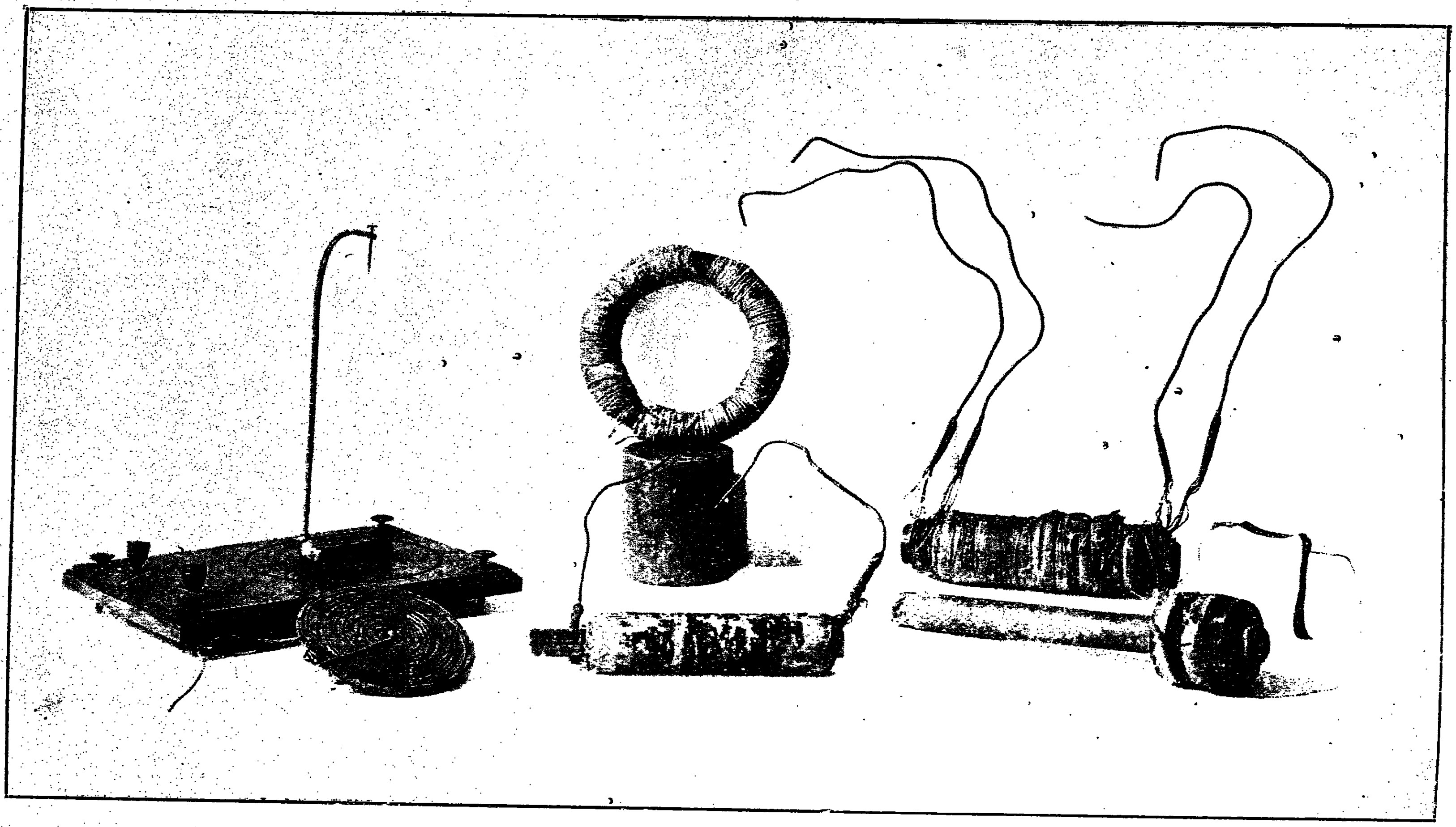
3. Charged a battery of 10 pr. plates 4 inches square. Made the coil on B side one coil and connected its extremities by a copper wire passing to a distance and just over a magnetic needle (3 feet from iron ring). Then connected the ends of one of the pieces on A side with battery. Immediately a sensible effect on needle. It oscillated & settled at last in original position. On breaking connection of A side with Battery again a disturbance of the needle.

4. Made all the wires on A side one coil and sent current from battery through the whole. Effect on needle much stronger than before.

5. The effect on the needle then but a very small part of that which the wire communicating directly with the battery could produce.

Page du Journal de FARADAY datée du 29 août 1831.

Photographie reproduite avec l'autorisation de la Royal Institution.



Appareils employés par Faraday pour ses expériences sur l'induction magnétique.

Photographie reproduite avec l'autorisation de la Royal Institution.

pour un historien de la science, mais aussi pour tous ceux qui désirent se former une idée des méthodes de travail intellectuel d'un grand pionnier scientifique.

On se rend compte ainsi de la somme de travaux difficiles et de patientes recherches qui s'imposent à qui veut établir un seul fait nouveau et le mettre à sa juste place dans la série de nos connaissances.

D'autres collaborateurs à la présente brochure se sont référés aux notes inscrites sur le Journal de Faraday à la date du 29 août 1831 ; je me bornerai donc à faire ressortir que, pour le choix des meilleurs dispositifs expérimentaux, Faraday fait preuve du remarquable sens physique si caractéristique chez lui.

Par intuition, il avait reconnu que ses chances de réussite seraient plus grandes si l'effet magnétique du courant était augmenté par l'emploi d'un anneau de fer ; comme nous le voyons dans ses notes, sa toute première expérience lui donna un résultat positif dans des conditions idéalement simples : un fil connecté au secondaire était tendu au-dessus de l'aiguille d'une boussole.

Dans la note où il rendit compte de sa découverte à la *Royal Institution*, l'ordre des expériences est entièrement changé.

Il considérait évidemment comme désirable d'exposer le sujet dans un ordre logique ; aussi parle-t-il d'abord de l'induction de courants électriques par l'emploi de bobines dans l'air, puis de l'effet des aimants et il termine en décrivant ses expériences avec l'anneau de fer.

Cette manière de présenter les faits scientifiques était très usitée à cette époque et c'est seulement dans des cas exceptionnels que l'on trouve des allusions à la succession réelle des expériences ayant amené une découverte.

C'est notamment le cas de la célèbre communication où Ampère posa les fondements de l'électrodynamique. L'espace me manque pour retracer la série magistrale des expériences par lesquelles Faraday établit de son côté, une fois pour toutes, les principes de l'induction électro-magnétique.

Il voit, mentalement, l'espace rempli de lignes de forces magnétiques dues au magnétisme terrestre. Il montre que des courants induits sont produits par le déplacement de bobines dans le champ terrestre ; il fait des expériences au pont de Waterloo pour déceler les courants dus à l'écoulement de l'eau ; il reconnaît que celui-ci équivaut au mouvement d'un conducteur au travers des lignes de forces

terrestres. Dans des articles postérieurs, il remarque que le courant induit dans les bobines par leur déplacement dans le champ terrestre, peut être utilisé pour déterminer la direction et la grandeur de ce champ et il est intéressant de noter que l'appareil réalisé, dans ce but, par Sir Arthur Schuster et Sir Franck Smith, est maintenant d'un emploi constant dans notre pays et s'est révélé comme constituant, à cette fin, la méthode la plus exacte et la plus sûre.

Après une série d'expériences destinées à démontrer que l'électricité produite par des moyens divers était toujours identique à elle-même, Faraday considère les différences marquées existant entre les propriétés des divers corps pour la conduction de l'électricité.

Ceci l'amène à un examen détaillé de la nature du passage de l'électricité dans les corps où il s'accompagne de décomposition chimique, c'est-à-dire dans les électrolytes, comme il les nomme.

Dans ces recherches sur les phénomènes d'électrolyse, nous voyons Faraday en possession de son maximum de puissance d'expérimentateur. Il étudie, avec grand soin, le passage de l'électricité à travers un grand nombre de corps liquides et solides et à travers ceux qui ne deviennent conducteurs que sous l'influence de la chaleur ; il enregistre minutieusement les phénomènes observés.

La somme de travail qu'il s'imposait était énorme, mais il avait toujours en vue un but bien défini.

Il devait, avant tout, dissiper un grand nombre de conceptions fausses et de théories erronées sur la nature de la décomposition électrolytique.

Il montra, en particulier, par une brillante expérience, que les actions électriques déterminant la décomposition chimique ne sont pas localisées, comme on le croyait alors, aux pôles ou électrodes, mais s'étendent au volume entier de l'électrolyte.

Il passe alors aux expériences qui l'ont conduit à formuler ses fameuses lois de l'électrolyse ; celles-ci ont résisté à l'épreuve du temps et ont constitué la base de recherches presque innombrables exécutées par les travailleurs successifs.

Pour obtenir des résultats quantitatifs, Faraday construit le voltamètre à eau et démontre qu'il fournit une mesure définie de la quantité d'électricité passant dans un circuit.

En possession de cet instrument de mesure, il démontre que les poids relatifs des éléments décomposés sont définis et proportionnels à leurs équivalents électro-chimiques, ce qu'il exprime souvent en disant qu'ils sont proportionnels à leurs poids atomiques. Il a montré

ainsi, pour la première fois, l'existence d'une relation remarquablement simple entre l'électricité et la matière et, à la lumière de nos connaissances actuelles, nous le voyons tout près de faire une découverte d'une importance plus fondamentale encore, celle de la nature atomique de l'électricité. Nous devons cependant nous souvenir qu'à cette époque la théorie atomique de DALTON était encore récente et que les poids atomiques relatifs d'un grand nombre d'éléments n'étaient pas exactement connus.

Comme nous allons le voir, FARADAY reconnaît l'importance de sa découverte, mais il hésite à en interpréter les résultats dans le langage de la théorie atomique. Par la suite, il ne fait plus allusion à la question et il était réservé à feu le Dr JOHNSTONE STONEY, près de 50 ans plus tard, de défendre hardiment la conception de la nature atomique de l'électricité, basée sur les équivalents électrochimiques des éléments.

Je citerai, pour illustrer l'attitude mentale de FARADAY devant les questions importantes, les remarques par lesquelles il conclut ses splendides travaux sur ce sujet :

« Très grande est l'harmonie, que cette théorie de l'évolution définie et de l'action définie équivalente de l'électricité introduit dans les théories associées des proportions définies et de l'affinité électrochimique ».

« Suivant cette théorie, les poids équivalents des corps sont simplement les quantités de chacun d'eux qui contiennent des quantités égales d'électricité, ou qui ont naturellement des pouvoirs électriques égaux; c'est donc l'électricité qui détermine le nombre équivalent, parce qu'elle détermine la force de combinaison. Ou, pour adopter la théorie ou la phraséologie atomique, les atomes des corps équivalents les uns aux autres dans leurs actions chimiques ordinaires, sont associés par la nature à des quantités d'électricité égales ».

« Mais je dois avouer que je me méfie du terme d'atome, car bien qu'il soit très facile de parler d'atomes, il est très difficile de se faire une idée claire de leur nature, spécialement lorsqu'il s'agit de corps composés. »

Il n'est pas possible, dans cet article sommaire, de passer en revue tous les sujets des nombreuses recherches entreprises par FARADAY, entre autres l'étude détaillée de la distribution de l'électricité à la surface des corps, comprenant les fameuses expériences du seau à glace et de la cage de fils, ses études sur la capacité inductive spécifique des isolants et ses longues séries de travaux sur les substances paramagné-

tiques et diamagnétiques. Ses expériences sur le magnétisme, entreprises dans la dernière partie de sa vie, ne révèlent aucun déclin de sa puissance ni de son habileté d'expérimentateur, ni de la patience et de l'énergie avec lesquelles il explorait toute voie lui donnant un espoir de réussite dans l'attaque d'un problème.

Je n'ai pas fait allusion ici à un grand nombre de ses notes intéressantes sur diverses questions de physique et de chimie ; telles ses expériences bien connues sur la liquéfaction des gaz, sa découverte du benzol, qui constituait une conquête de grande importance pour la chimie et pour l'industrie chimique.

Si nous considérons la variété et la valeur des contributions qu'il a apportées à la science et des résultats qu'il a publiés sur tant d'expériences individuelles qui s'y rattachaient, nous ne pouvons manquer d'être impressionnés, non seulement par son extraordinaire industriosité et par son habileté expérimentale, mais aussi par son inépuisable originalité d'esprit dans la création de nouvelles méthodes d'attaque.

Comme nous le voyons clairement dans ses livres de notes, il préparait soigneusement son travail quotidien et il mentionnait parfois les espoirs qu'il nourrissait pour les jours suivants.

Quand le résultat d'une expérience bien combinée lui a montré l'exactitude d'une idée, il enregistre parfois sa satisfaction en ajoutant, à la fin de la description, le mot « excellent ».

Au début d'une note célèbre enregistrant la découverte d'une nouvelle relation entre l'électricité et la lumière, (je fais allusion ici à la rotation, dans certains corps, du plan de polarisation de la lumière sous l'action d'un champ magnétique), il fait cette déclaration souvent citée :

« J'ai depuis longtemps l'opinion, qui est presque devenue une conviction, chez moi et aussi, je crois, chez beaucoup d'autres adeptes des sciences naturelles, que les diverses formes sous lesquelles se manifestent les forces matérielles ont une origine commune ; ou, en d'autres termes, qu'elles sont si directement liées et dépendantes, qu'elles peuvent être transformées l'une dans l'autre en conservant, dans leur action, une puissance équivalente ».

Une vue d'ensemble des recherches de Faraday nous montre que l'idée fondamentale de l'unité de toutes les forces de la nature était la source de ses principales recherches et cela dès le début de sa carrière scientifique.

Cette conviction nous donne, ce n'est pas trop dire, la clé du succès extraordinaire qu'il remporta dans l'accroissement de nos connaissances.

Beaucoup d'exemples pourraient appuyer cette opinion. On voit, d'après le début de la note de son Journal où il décrit la découverte de l'induction électro-magnétique, qu'il entreprit cette recherche avec l'idée de trouver une nouvelle relation entre l'électricité et le magnétisme. Dans ses recherches sur l'électrolyse, il étudie le rapport entre l'électricité et les actions chimiques.

Dans son article sur les rotations magnétiques, il annonce une nouvelle relation importante entre le magnétisme et la lumière. De même, il espérait trouver un rapport entre l'électricité et la gravitation et il exécuta, dans ce but, mais sans succès, un grand nombre d'expériences.

La dernière expérience de sa vie, en 1862, avait pour but de trouver encore une autre relation entre le magnétisme et la lumière, en étudiant l'effet d'un champ magnétique sur le spectre d'une source lumineuse. Les dispositifs expérimentaux qu'il imagina étaient à tous égards admirablement appropriés au but poursuivi et si le pouvoir de dispersion du spectroscope n'eût été à cette époque insuffisant pour mettre en évidence un phénomène aussi ténu, FARADAY aurait certainement enrichi la science de la découverte d'une nouvelle liaison de première importance entre le magnétisme et la lumière.

Trente ans plus tard, le Professeur ZEEMAN, grâce à un dispositif semblable à celui de FARADAY, mais avec des méthodes optiques plus sensibles, réussit à démontrer clairement l'effet d'un champ magnétique sur le spectre d'une source lumineuse et établit ainsi une nouvelle et féconde méthode d'investigation sur la constitution des atomes.

Plus nous étudions l'œuvre de FARADAY dans le recul du temps, plus nous sommes frappés de son génie sans rival d'expérimentateur et de savant.

Quand nous considérons la grandeur et l'étendue de ses découvertes, leur influence sur le progrès de la science et de l'industrie, nous reconnaissons que nous ne pouvons accorder de trop grand honneur à la mémoire de FARADAY, qui fut l'un des auteurs des plus grandes découvertes scientifiques de tous les temps.

LE SUCCÈS APRÈS L'ÉCHEC

MAGNÉTISME ET ÉLECTRICITÉ

La Grande Découverte

par Sir William BRAGG O. M., F. R. S.

Ses expériences du 29 août 1831 donnèrent à FARADAY la première vision du grand principe de l'induction électromagnétique. Au cours des quelques années suivantes, pleines de méditations intenses et d'ardentes recherches, il arriva à saisir clairement, non seulement ce principe, mais deux autres d'importance aussi fondamentale.

Lorsque le mathématicien CLERK MAXWELL, ayant compris la portée des expériences de FARADAY et de leur interprétation, y ajouta un quatrième principe, mis d'abord en lumière, en 1820, par OERSTED de Copenhague, il fut à même d'établir, sur ces quatre bases, la théorie mathématique de l'électro-magnétisme.

Sur cette théorie, il basa l'hypothèse que la lumière pouvait être représentée par une onde électro-magnétique dans un éther continu.

En même temps, il rendit possible le calcul des influences mutuelles de l'électricité et du magnétisme, aussi bien dans le vaste champ des théories modernes que dans les travaux de l'ingénieur électricien.

Ainsi, l'aspect du monde moderne, dans le domaine de la pensée comme dans celui de la pratique, est sorti d'une série de découvertes auxquelles FARADAY prit la plus grande part et dont l'expérience du 29 août 1831 constitue le principe et le centre.

Il est intéressant de considérer les degrés successifs qui ont abouti aux événements de cette journée.

La pile électrique de VOLTA était un assemblage de feuilles de cuivre, de zinc et de drap humide empilées régulièrement, forme primitive de la batterie électrique moderne.

Quand des fils étaient attachés aux plaques terminales de la pile, soit respectivement à un cuivre et à un zinc, les autres extrémités des

fils, placées aux points convenables, produisaient un mouvement convulsif des nerfs et des muscles vivants ; les pattes d'une grenouille constituaient ordinairement le sujet de l'expérience.

C'était en fait, une décharge électrique.

En 1820, le danois Oersted fit une surprenante découverte.

La pile de Volta avait été transformée, à cette époque, de manière à ressembler davantage à nos batteries électriques actuelles. Une paire de plaques, zinc et cuivre, placée dans une cuve contenant de l'acide dilué, constituait la cellule unitaire ; un certain nombre de ces cellules, montées en série, formait une batterie beaucoup plus efficace et d'un emploi plus facile que la pile de feuilles et de draps mouillés.

Oersted reconnut qu'un fil, réunissant les deux extrémités d'une telle batterie, agissait sur une aiguille aimantée.

Si le fil était placé parallèlement à l'aiguille et aussi près que possible, soit au-dessus, soit au-dessous, l'aiguille tournait pour s'orienter, non plus parallèlement, mais obliquement au fil.

Si l'on inversait les connexions du fil à la batterie, l'extrémité d'abord reliée au dernier cuivre étant réunie au dernier zinc à l'autre bout de la batterie et vice-versa, toutes les autres conditions de l'expérience restant les mêmes, l'aiguille tournait jusqu'à prendre la même inclinaison, mais de l'autre côté du fil.

Tant que la batterie débitait, la déviation de l'aiguille persistait.

Si l'on admet que la connexion permanente du fil aux deux extrémités de la batterie fait passer une décharge continue d'électricité dans le fil, on pouvait en conclure qu'un courant électrique dévie un aimant.

Les expériences d'Oersted furent répétées à Genève par de la Rive ; à l'automne de 1820, Arago les décrivit devant l'Académie française des Sciences. Ampère poussa la découverte plus loin dans le même ordre d'idées en montrant que deux fils parcourus par des courants électriques agissaient l'un sur l'autre.

Arago et Davy montrèrent, indépendamment l'un de l'autre, qu'un fil conduisant un courant électrique, aimante l'acier et le fer.

Tous ces phénomènes constituaient des variantes du grand principe qu'Oersted n'avait pas su dégager, c'est-à-dire qu'un courant électrique possède des propriétés magnétiques, en d'autres termes, qu'il est équivalent à un aimant.

Ampère remarqua que la valeur de la déviation d'un aimant pouvait être utilisée pour mesurer l'intensité du courant qui la produisait et il proposa, le premier, le nom de galvanomètre ; il suggéra

aussi l'idée que les propriétés d'un aimant pouvaient être attribuées à l'existence de courants électriques circulant continuellement dans de très petits conduits à l'intérieur des atomes du fer.

En 1821, FARADAY montra qu'un fil parcouru par un courant électrique pouvait être disposé de manière à tourner continuellement autour d'un pôle magnétique et vice versa.

Il est assez difficile de donner, sans figures, une description claire de tous ces phénomènes et de ces dispositifs, mais le seul point qu'il faille retenir est que, en 1820, le premier des quatre grands principes avait été établi : un courant électrique produit un effet magnétique.

Ceci conduisit naturellement à rechercher une action réciproque. Un aimant ne doit-il pas produire un effet électrique ? Si un courant électrique peut créer un aimant là où il n'y en avait pas auparavant, ne doit-on pas s'attendre à ce qu'un aimant fasse naître un courant électrique ?

La réciprocité pourrait être encore envisagée sous une forme un peu différente, mais de signification équivalente. Un aimant peut induire du magnétisme dans un morceau de fer, du simple fait de sa proximité ; puisque les courants électriques se comportent comme des aimants, un fil que parcourt un courant ne doit-il pas aussi faire passer, grâce à une proximité du même ordre, un courant dans un fil voisin ?

Le Journal de FARADAY donne le compte rendu suivant de ses reches sur ce phénomène.

« 28 *novembre* 1825. — Expériences sur l'induction, en connectant les fils de la batterie voltaïque. Une batterie de 4 piles de 10 paires de plaques chacune, placées côte à côte.

1e *Expérience.* — Les pôles sont reliés par un fil d'environ 1,20 m de long. Un autre fil semblable, placé parallèlement au premier, n'en est séparé que par deux épaisseurs de papier. Les extrémités du second fils sont reliées à un galvanomètre. Aucune action ne se manifeste.

2e *Expérience.* — Pôles de la batterie reliés par une hélice recouverte de soie. Un fil droit traverse cette hélice, ses deux extrémités étant reliées au galvanomètre. Aucune action.

3e *Expérience.* — Les pôles de la batterie sont reliés par un fil droit au-dessus duquel est placée une hélice dont les extrémités sont reliées au galvanomètre. Aucune action.

Impossible, par n'importe quel moyen, de faire apparaître une induction produite par le fil de connexion. »

Il est à peine nécessaire de dire que FARADAY n'envisageait pas comme il convenait le phénomène qu'il devait découvrir plus tard.

Il s'attendait à ce qu'un courant passât dans un des fils au simple voisinage d'un courant traversant l'autre. En réalité, l'expérience qu'il décrit lui aurait montré ce qu'il cherchait, si son galvanomètre avait été assez sensible et s'il ne s'était pas attendu à constater le passage continu d'un courant. Dans ces conditions il était naturel qu'il échouât.

La journée historique.

Le 29 août 1831, il reprit sa recherche, mais cette fois avec un nouveau dispositif expérimental. Il réalisa ce que nous appelons maintenant un transformateur fermé. Il enroula séparément sur un anneau de fer deux bobines de fil. Le fer, qui formait ainsi le noyau commun des deux bobines, était le trait essentiel de l'expérience; ceci devait forcément, nous le savons maintenant, lui donner le renseignement qu'il cherchait. Mais ce qu'il savait à cette époque ne pouvait l'en assurer; du moins, s'il avait des raisons de pouvoir compter sur un résultat qu'il n'avait pu obtenir dans ses essais antérieurs, il ne nous les fait pas connaître.

« Il établit une batterie de 10 paires de plaques de 20 cm^2; il réunit les extrémités de l'une des bobines par un fil de cuivre passant à une certaine distance et juste au-dessus d'une aiguille aimantée placée à 1 mètre de l'anneau de fer. Il relia ensuite les extrémités de l'autre bobine à la batterie et il observa immédiatement un effet sensible sur l'aiguille. Elle oscilla, puis revint finalement à sa position première.

En rompant la connexion de la batterie, nouveau déplacement de l'aiguille. Donc, action, mais passagère. »

Il avait ainsi découvert ce qu'il savait devoir sûrement exister sous une forme ou sous une autre, l'action réciproque entre l'électricité et le magnétisme. Oersted avait montré qu'un courant électrique pouvait produire du magnétisme. Faraday démontrait maintenant qu'une action magnétique pouvait produire un courant électrique.

Dans son essai antérieur, décrit ci-dessus, il cherchait à produire un courant dans un fil placé simplement au voisinage d'un autre fil parcouru par un courant ou, ce qui revient au même, au voisinage d'un aimant immobile. Rien de pareil ne s'était produit.

Que venait-il de trouver ? Quand il envoyait le courant de la batterie dans une des bobines entourant l'anneau, il aimantait l'anneau, conformément au principe d'Oersted.

L'anneau aimanté traversait la seconde bobine, connectée au fil passant près de l'aiguille.

Pendant que cette aimantation se produisait, mais seulement alors, et non pas lorsqu'elle était devenue complète, un courant était engendré dans la 2e bobine. Ce n'était pas le magnétisme lui-même, mais sa variation, qui donnait la réciprocité cherchée.

De même, lorsqu'on rompait le circuit de la batterie et que l'aimantation disparaissait de nouveau, ce changement produisait aussi son effet. Un courant passait encore dans le second fil, mais en sens inverse.

Bien que, par ce travail d'une seule journée, un principe fondamental eût été découvert et exactement décrit, de longues séries d'expériences furent nécessaires pour en établir toute la portée.

On peut dire, en somme et en termes généraux, qu'une variation de magnétisme tend à mettre l'électricité en mouvement.

La première expérience de FARADAY était un cas particulier. La production de courant électrique par le déplacement relatif des aimants et des bobines d'une dynamo en est un autre.

Un résultat inattendu

On remarquera que l'action réciproque découverte par FARADAY entre l'électricité et le magnétisme, n'était pas du genre de celle qu'il attendait.

L'idée s'était répandue qu'un aimant placé près d'un fil devait y engendrer de l'électricité, puisqu'un fil parcouru par un courant électrique et placé près d'un morceau de fer y engendrait du magnétisme.

La véritable réciprocité consiste en ceci, que le mouvement de l'électricité (c'est-à-dire le courant électrique) détermine un phénomène magnétique et que le magnétisme en mouvement détermine un phénomène électrique.

Le mouvement est essentiel dans les deux cas. Un mouvement relatif est seul nécessaire ; un aimant peut être déplacé par rapport à un conducteur immobile, ou un conducteur peut être déplacé par rapport à un aimant immobile. Dans les deux cas, le résultat est une tendance au déplacement de l'électricité dans le conducteur.

Il n'est pas aisé de réaliser, à première vue, toute l'importance de ces expériences que FARADAY exécuta avec ses bouts de fils de fer et ses archaïques batteries,

Il faut se rappeler que le rôle de l'interaction de l'électricité et du magnétisme est, dans l'univers, fondamental. Elle se manifeste sous forme très directe dans la lumière, la chaleur, les radiations de toutes sortes. Sous une autre forme, elle apparaît comme une force chimique, régissant les phénomènes matériels de la nature animée et inanimée.

Les propriétés physiques des corps en dépendent. Guidés par sa compréhension correcte, le savant poursuit sa route dans les étranges régions de la pensée physique moderne et l'ingénieur électricien élève ses constructions multiformes.

Il ne reste plus qu'à mentionner brièvement les deux autres principes que Faraday a découverts et décrits.

Comme nous l'avons dit ci-dessus, un aimant en mouvement tend à déplacer l'électricité dans son voisinage, mais il ne crée qu'une tendance.

Le résultat de cette tendance au déplacement dépend des circonstances. Quelques corps, dits conducteurs, laissent passer l'électricité d'une manière continue, suivant une règle clairement énoncée par Ohm.

Mais, en dehors de cet effet particulier, il existe une loi plus générale reliant la cause à l'effet et applicable à tous les corps; cette loi, Faraday l'a étudiée et énoncée. Un phénomène parallèle se présente, comme Faraday l'a remarqué, dans le cas du magnétisme.

Le magnétisme engendré, dans un espace quelconque, par un courant électrique, dépend de la matière qui occupe cet espace, fer, nickel, bois, ou toute autre substance.

En résumé, il existe, en tout cas, quatre grands principes de l'électro-magnétisme ; Clerk Maxwell les a formulés en écrivant ses quatre célèbres équations mathématiques.

UNE INTELLIGENCE DE MÊME NATURE AUX ÉTATS-UNIS

LES EXPLOITS DE JOSEPH HENRY

La Smithsonian Institution

par le Professeur W.F. MAGIE

JOSEPH HENRY était un physicien américain dont la vie fut, à beaucoup d'égards, semblable à celle de FARADAY; leurs œuvres scientifiques présentent de nombreux points de contact.

Il était né à Albany, New-York, le 17 décembre 1797 ; son père était journalier ; sa famille appartenait à un très humble milieu.

Comme FARADAY, il fit de l'apprentissage commercial, dans l'espèce chez un horloger bijoutier. Il avait peu de goût pour ce genre de travail et il avait coutume de dire qu'on le considérait comme trop borné pour apprendre le commerce.

De même que l'attention de FARADAY fut attirée vers les sciences expérimentales par la lecture des « Conversations on chemistry » de Mme MARCET, l'intérêt de HENRY fut éveillé par les conférences du Dr GREGORY sur « experimental philosophy, astronomy and chemistry ».

Il n'avait reçu d'autre instruction que celle donnée dans les écoles rurales à cette époque.

Au prix d'un travail opiniâtre et d'une grande abnégation, il réussit à se préparer, en une année ou deux, à l'admission dans une classe supérieure de l'*Académie d'Albany*, qui jouissait alors d'une grande réputation et où il paraît avoir fait preuve d'un très vif intérêt pour la science.

Il y remplissait, tout en étant encore étudiant, les fonctions de préparateur du cours de chimie, ce qui lui permettait de compléter sa formation sans être troublé par la nécessité de s'assurer autrement des ressources.

Ses études terminées, il passa deux ans comme précepteur privé dans

une riche famille, employant ses moments de liberté à étudier la chimie et la physiologie en vue de faire ses études de médecine. Il fit aussi des mathématiques.

A l'automne de 1826, il fut élu à la chaire de mathématiques et de sciences naturelle de l'*Académie d'Albany*.

Si l'on considère les conditions d'existence d'HENRY, à cette époque, on est étonné de tout ce qu'il a pu faire. Il enseignait 7 heures par jour et son seul temps vraiment libre était celui des vacances d'été.

Il n'avait à sa disposition ni laboratoire, ni instruments scientifiques convenables. Il devait construire ses appareils lui-même avec des matériaux qu'il achetait ; il était très isolé.

Il n'y eut rien dans sa vie de comparable aux occasions favorables dont bénéficia FARADAY par son association intime avec Sir HUMPHRY DAVY et avec les autres savants distingués qui fréquentaient la *Royal Institution*.

Malgré ces conditions défavorables, il entreprit, dès qu'il eut pris possession de sa nouvelle situation, des recherches dans le domaine relativement nouveau de l'électromagnétisme.

Il se rendit compte, tout d'abord, qu'il pouvait, en isolant les fils nus employés dans la construction des appareils destinés à montrer l'action mutuelle des courants électriques, les enrouler en bobines ; l'effet magnétique obtenu ainsi était augmenté sans avoir recours à de grandes et coûteuses batteries voltaïques.

Sa première note sur ce sujet, présentée à l'*Albany Institute* relate les résultats obtenus par ce perfectionnement. Cette méthode lui permettait désormais de mettre en évidence tous les effets électromagnétiques en n'employant qu'une seule pile voltaïque.

Batteries et aimants.

Il reconnut ensuite que l'emploi de semblables fils isolés permettait d'améliorer la construction des électro-aimants.

L'aimant de STURGEON, généralement employé alors, était constitué d'une barre de fer pliée en forme de fer à cheval et enduite de cire à cacheter ; on y enroulait une spirale lâche de quelques mètres de fil de cuivre nu.

L'emploi de fil isolé permit à HENRY de rapprocher les spires jusqu'au contact et de les enrouler les unes sur les autres en plusieurs couches.

Il constata que, ainsi construits, ses aimants étaient beaucoup plus

puissants que tous ceux dont il avait eu connaissance. Il exposa, à l'*Albany Institute*, en 1828, le premier appareil exécuté sur ce modèle.

Dans la suite, il en fit d'autres et de plus puissants. Le plus grand de tous, qu'il construisit après son installation à Princeton, portait un poids de 1,8 kg.

Henry commença de bonne heure des recherches sur la transmission de l'action magnétique à travers un long circuit ; il reconnut que, pour y arriver, il était nécessaire de monter en série un certain nombre de piles et que l'électro-aimant qui agissait le mieux était muni d'un long fil enroulé en un grand nombre de tours. Il appela cette batterie, « batterie d'intensité » et l'aimant, « aimant d'intensité ».

Il donna, à une autre forme d'aimant dans laquelle un certain nombre de bobines étaient enroulées en parallèle autour du noyau de fer, le nom d' « aimant de quantité ».

Il étudia les caractéristiques de ces aimants, sur un aimant constitué de plusieurs bobines dont les extrémités étaient dégagées, de manière à pouvoir être connectées de diverses manières. Les électro-aimants de Henry étaient de beaucoup supérieurs à ceux que construisait, à peu près à la même époque, Moll d'Utrecht.

Tout en travaillant à la construction de ces aimants, Henry se préoccupait de la production de l'électricité par le magnétisme. Il avait paru à beaucoup de gens que, si l'on pouvait produire le magnétisme par l'électricité, il devait être possible d'obtenir, d'une manière ou de l'autre, l'action inverse. Au mois d'août 1831, il construisait, en vue de ces expériences, un grand électro-aimant et une grande bobine de fil isolé.

Lorsque l'école se rouvrit à l'automne, il laissa de côté son travail pour se consacrer à ses devoirs de professeur et il paraît ne plus s'être occupé de la question jusqu'en juin de l'année suivante ; il lut alors, dans les « Annals of Philosophy » un bref compte rendu d'une communication faite par Faraday à la *Royal Institution* où celui-ci relatait les traits essentiels de sa découverte sur le courant induit. Il reprit alors la question et publia, en juillet 1832, une note décrivant une expérience où il avait produit du courant induit ; il ajoutait que cette expérience avait été faite avant qu'il n'ait eu aucune connaissance du dispositif de Faraday.

Dans celui d'Henry, une bobine de fil isolé était enroulée en spires serrées autour de l'armature de l'aimant. Cette armature était placée et solidement fixée contre l'aimant. Les extrémités de la bobine étaient

réunies à deux longs fils reliés à un galvanomètre. Quand on enfonçait les plaques de la batterie actionnant l'aimant, l'aiguille du galvanomètre était projetée, momentanément, dans un certain sens. Quand on relevait les plaques, l'aiguille se déplaçait dans le sens opposé. On ignore à quelle date cette expérience fut tentée pour la première fois. Il semble probable que ce fut dès l'été de 1831 et peut-être dès 1830.

Miss Mary A. Henry dit que son père exprimait souvent devant sa famille le regret d'avoir remis si longtemps la publication de sa découverte et elle cite la déclaration suivante d'un ami de son père :

« Votre père m'a souvent parlé de son désappointement à propos de cette découverte. » « J'aurais dû la publier plus tôt », avait-il coutume de dire, « mais j'avais si peu de temps. Il était si difficile d'aboutir ! Je désirais présenter sous une forme satisfaisante les résultats que j'avais obtenus et comment aurais-je pu savoir qu'un autre, de l'autre côté de l'Atlantique, s'occupait de la même question ».

Henry n'a jamais rien publié au sujet de la découverte du courant induit, dans le but d'en réclamer la priorité. Il a toujours attribué celle-ci à Faraday. Cependant, d'après les témoignages ci-dessus, il paraît probable qu'il fut bien le premier à faire la découverte et que c'est seulement son désir de perfectionner son œuvre avant de la publier qui l'a privé de s'en voir attribuer l'honneur.

Dans la même note où il présentait son travail, Henry décrivait une expérience montrant que, lorsque les pôles d'une pile voltaïque étaient réunis par un fil court, aucune étincelle n'apparaissait, soit quand on établissait le circuit, soit quand on le rompait ; mais, lorsque les pôles étaient réunis par un fil de grande longueur et, en particulier, si ce fil était enroulé en spirale sur lui-même, alors que, à l'établissement du circuit on faisait la même constatation que dans le premier cas, une étincelle brillante se produisait lorsqu'on rompait le circuit.

Henry attribuait ce résultat à la production d'un courant induit dans le circuit lors de la disparition du courant même qui le parcourait et il se référait, dans ses explications, aux observations faites par Faraday.

A l'automne de 1832, Henry fut appelé à occuper la chaire de sciences physiques du collège de New-Jersey (actuellement *Université de Princeton*) à Princeton, New-Jersey. Son départ pour cette ville et l'obligation de consacrer à cet enseignement son temps et son intelligence dérangèrent, pour un temps, le cours de ses recherches.

En 1835, il apprit que Faraday s'occupait du phénomène de l'extra-courant. Il rassembla alors ses études sur la question et il les présenta

à la *Société Américaine des Sciences de Philadelphie*. Un extrait de sa communication fut publié de suite à la requête de ses amis, qui insistèrent pour qu'il ne laissât pas méconnaître sa priorité sur la question.

Tandis qu'il était encore à Albany, il construisit un petit modèle de moteur électro-magnétique dans lequel une barre de fer, entourée d'un fil isolé et posée horizontalement en équilibre sur deux supports verticaux, au-dessus d'un long aimant permanent, oscillait automatiquement lorsqu'on lançait alternativement en sens opposés des courants électriques dans la bobine.

Henry considérait cet instrument comme « un jouet scientifique » tout en croyant que, peut-être, dans l'avenir, il serait possible d'établir, sur un type analogue, quelque appareil susceptible d'utilisation.

Mais, considérant le prix de la batterie voltaïque nécessaire pour actionner le moteur, il conclut que celui-ci ne pouvait être d'un emploi économique.

Ce fut aussi à Albany qu'Henry installa un circuit de près de 1 600 m de fil tendu le long des murs d'une des vastes salles de l'Académie.

Ce circuit contenait l'un de ses aimants d'intensité, actionné par une batterie d'intensité et qui actionnait un aimant permanent monté sur pivot ; cet aimant frappait sur une cloche et transmettait ainsi des signaux.

Une fois installé à Princeton, Henry posa un fil entre son Laboratoire et son domicile situé à quelque distance et il compléta le circuit par la terre en utilisant pour cela deux puits.

Par ce circuit, il transmettait des signaux grâce à un dispositif semblable, en principe, à celui qu'il avait employé à Albany.

Le courant du circuit lui servait à actionner, dans son laboratoire, un électro-aimant qui soulevait un fil fourchu hors de deux coupelles de mercure, rompant ainsi le circuit du grand aimant.

Ce dispositif impliquait le principe du relais, qui fut, dans la suite, appliqué en télégraphie ; l'ensemble du système constituait un précurseur du télégraphe électromagnétique tel qu'il fut repris par Morse.

En 1837, les administrateurs du collège donnèrent à Henry un congé d'un an avec plein traitement, pour lui permettre de se rendre en Europe.

A Londres, il se lia d'une étroite amitié avec Faraday et ils eurent ensemble de fréquents entretiens.

En Angleterre et à Paris, il rencontra encore d'autres savants dis-

tingués. Il présenta deux communications à la séance de la *British Association* au mois de septembre de cette même année.

Rentré à Princeton, il reprit l'étude des courants induits.

Faraday avait abandonné la question et les autres chercheurs qui l'avaient travaillée après lui avaient étudié, nous dit Henry « l'induction par le magnétisme et le perfectionnement de la machine magnéto-électrique et, à ma connaissance, aucune tentative, en dehors de la mienne, n'a été faite pour reprendre et poursuivre la partie purement électrique de l'admirable découverte du Dr Faraday. »

Il lut sa première communication sur ce sujet général en novembre 1838.

Il confectionna, pour s'en servir dans les expériences qu'il projetait, un certain nombre de rubans de cuivre en spirales plates, isolés à la soie et aussi un jeu d'hélices de plusieurs centaines de mètres de fils de cuivre. Pour révéler la présence et la direction du courant, il employait le plus souvent ce qu'il appelait une spirale magnétisante. C'était une simple bobine de fil enroulée en spirale autour d'une paille ou d'un tube de verre mince ; il plaçait, à l'intérieur, une aiguille à coudre qui s'aimantait lorsqu'un courant parcourait la bobine.

Il utilisait aussi, dans le même but, la secousse ressentie dans les bras ou dans le corps. Quelquefois, il employait, pour révéler la présence d'un courant de quantité, un petit électro-aimant de quantité et parfois une cellule électrolytique.

Henry démontra le premier, en employant une longue hélice, que le courant de self induction qui se manifeste lors de l'ouverture du circuit, était d'une grande intensité, comme le prouvait la secousse qu'il produisait sur le corps humain.

En réalisant diverses combinaisons entre les spirales de cuivre et les hélices de fil, il montra qu'un courant de quantité dans le primaire pouvait produire, soit un courant de quantité, soit un courant d'intensité, suivant qu'on prenait pour le secondaire une autre spirale ou une hélice et, de plus, qu'un courant d'intensité pouvait produire un courant de quantité dans le secondaire.

Il chercha alors à produire des courants induits d'un ordre supérieur au premier.

Ayant réuni les extrémités du secondaire ordinaire à une autre bobine semblable placée à une petite distance, il utilisa cette partie du secondaire comme primaire pour actionner une autre bobine située au-dessus.

Il n'était nullement certain qu'un phénomène quelconque apparaîtrait dans la troisième bobine.

Il semblait possible que la croissance et la décroissance du courant secondaire se produiraient en un temps assez court pour confondre leurs effets.

Il constata cependant la production d'un courant d'intensité considérable dans la bobine tertiaire.

L'introduction d'autres bobines dans des dispositifs semblables, mais plus complexes, lui permit d'étudier des courants induits jusqu'au 5^e ordre.

Il reconnut qu'ils pouvaient difficilement être révélés par les méthodes employées pour déterminer la quantité, mais que, d'ordinaire, ils aimantaient l'aiguille de la spirale magnétisante et donnaient, dans le corps humain, des secousses très perceptibles.

En réfléchissant à la courte durée du courant secondaire qui induisait les courants d'ordres supérieurs, il conçut alors l'espoir que la décharge d'une bouteille de Leyde produirait un effet semblable. Il constata qu'il en était bien ainsi, et il fut à même d'observer des courants induits déclanchés dans les bobines successives par les décharges de la bouteille.

Il fut très frappé de la distance à laquelle pouvait être transmis l'effet d'induction dû à la décharge électrique.

Dans une expérience faite à son laboratoire, la distance entre le primaire et le secondaire était de plus de 10 m et deux planchers les séparaient.

Dans une autre expérience, il déchargea une bouteille de Leyde dans le fil télégraphique qui réunissait le laboratoire à son domicile. Il reconnut que la spirale magnétisante décelait un courant induit dans un fil parallèle situé à plus de 80 m de distance.

La spirale magnétisante révélait l'existence d'un courant, même lorsque le fil secondaire présentait une coupure, ce qui démontrait que le courant n'était pas dû à une perte du primaire par la terre.

Ce dispositif était presque exactement celui de la télégraphie sans fil.

Quelques anomalies apparentes dans la direction des courants induits des divers ordres, décelées par la spirale magnétisante, conduisirent Henry à examiner de plus près la manière dont celle-ci se comportait.

Appliquant une suggestion due à Savary, il reconnut que, lorsque la bouteille se déchargeait plusieurs fois dans le même sens, à travers

la spirale, l'aiguille ne s'aimantait pas toujours dans le même sens et il en conclut que la décharge d'un conducteur électrisé n'est pas un simple passage de l'électricité dans une seule direction, mais consiste en une succession de décharges de directions opposées ; autrement dit que la décharge est très souvent oscillatoire.

Cette conclusion d'Henry fut, depuis, confirmée par les expériences de Feddersen et la théorie en a été établie par Lord Kelvin.

James Smithson, citoyen anglais, légua, par testament, une fortune de 100 000 livres aux Etats-Unis d'Amérique pour fonder à Washington, sous le nom de « *Smithsonian Institution* », un établissement destiné à accroître et à diffuser la science parmi les hommes.

Après plusieurs années de discussions, au cours desquelles furent proposés divers projets pour l'emploi de ce legs, le Congrès finit par créer, en 1846, un conseil de régence, chargé d'affecter les revenus du legs Smithson d'une manière conforme à ses clauses et sous la condition qu'un bâtiment serait élevé pour recevoir les collections scientifiques et artistiques et une bibliothèque.

Le Conseil comprit que le succès de l'*Institution* dépendrait avant tout de la personnalité qui serait choisie comme Secrétaire. Henry était au nombre des savants dont l'avis avait été demandé, au cours de la discussion, au sujet d'un emploi convenable du legs. Dès l'abord, il avait suggéré que le legs devait être administré pour le plus grand bénéfice de l'humanité entière et que, par suite, il devait être employé à accroître les connaissances générales en stimulant les recherches originales et en diffusant l'instruction par la publication de travaux originaux et de rapports sur les progrès de la science.

Non seulement la réputation scientifique d'Henry était grande, mais on connaissait son entière intégrité et son jugement sain ; après avoir beaucoup hésité à abandonner ses travaux de Princeton, il répondit à l'appel du Conseil de régence et accepta la situation de secrétaire de la *Smithsonian Institution* en décembre 1846.

L'œuvre scientifique d'Henry fut très réduite pendant les 30 dernières années de sa vie, en raison des nombreux devoirs de sa charge. Il introduisit des méthodes d'observations météorologiques en diverses régions des Etats-Unis ainsi que la transmission télégraphique de leurs résultats à Washington, où on pouvait les étudier.

Le système de prédiction du temps qui fut déduit de ces observations prit une telle importance nationale, que le gouvernement en fit bientôt rentrer le service dans ses attributions.

Henry était membre du *Conseil des Phares* et Président de son Co-

mité d'expériences. Il s'occupa aussi des signaux par temps de brouillard et de la difficulté particulière, signalée quelquefois, de les entendre en mer.

Il reconnut que toutes ses observations pouvaient être coordonnées par la théorie de Stokes, qui expliquait comment la direction suivie par une onde sonore peut être modifiée par le vent dominant.

Il avait atteint sa 80ᵉ année et il s'occupait de recherches pour le *Conseil des Phares*, lorsqu'il ressentit les premiers symptômes de néphrite. La maladie progressa rapidement et finit par l'emporter, le 13 mai 1878, à Washington.

DEUX ÉCOLES INTELLECTUELLES

MATHÉMATIQUES ET PHYSIQUE

La théorie de Maxwell

par Sir J. J. Thomson, O. M., F. R. S.

Lorsque Maxwell, immédiatement après avoir obtenu ses grades universitaires en 1854, aborda l'étude de l'électricité, il prit la résolution de ne lire aucun travail mathématique traitant de ce sujet avant d'avoir pris connaissance des « Experimental researches » de Faraday sur l'électricité. Cette étude se présentait alors dans des conditions très anormales, car il y avait deux écoles intellectuelles : l'école mathématique regardait les forces qui s'exerçaient entre les charges électriques ou entre les pôles magnétiques, comme le résultat d'une action directe à distance ; l'espace entourant ces charges était exactement le même que tout le reste de l'espace et ne faisait intervenir que la distance. En partant de cette hypothèse, on résolvait beaucoup de problèmes particuliers et, si leurs solutions mettaient en relief la beauté et l'ingéniosité des méthodes analytiques employées, ces problèmes ne pouvaient toutefois être considérés comme présentant par eux-mêmes une importance physique fondamentale.

De l'autre école était Faraday qui, inspiré et guidé par un point de vue complètement différent avait, pendant des années, découvert coup sur coup des phénomènes entièrement nouveaux.

Pour lui, les charges ou les pôles n'étaient que les origines de faisceaux de lignes (lignes de forces), se répandant à travers l'espace environnant.

C'est à ces lignes qu'il attribuait les effets produits par les charges électriques et par les aimants ; pour lui, c'étaient elles qui avaient une réelle importance.

Il les regardait comme quelque chose de plus que des lignes géométriques. Il leur attribuait des propriétés physiques définies, celle, par exemple, d'être en état de tension et c'est cette tension qui produisait les forces entre les charges électriques ou les aimants.

FARADAY ne savait rien de l'analyse mathématique ; dans les « Electrical Researches », comme dans les « Principia » de NEWTON, on ne trouve, du commencement à la fin, aucun symbole algébrique et pour lui l'œuvre des mathématiciens était complètement incompréhensible. Les mathématiciens, d'autre part, ne pouvaient comprendre FARADAY et se montraient plutôt méprisants.

« Je déclare », écrivait AIRY en 1855, « avoir peine à imaginer que quelqu'un, connaissant la concordance entre l'expérience et les calculs basés sur la théorie de l'action à distance, hésite un instant à faire choix entre cette action simple et précise, d'une part et, de l'autre, quelque chose d'aussi vague et d'aussi variable que les lignes de forces. »

Celui qui écrivit ces lignes n'a pas compris que si la théorie de l'action à distance a pu se prêter au mieux à certains types de calculs, la conception des lignes de force suggère des possibilités débordant de beaucoup le domaine de l'autre théorie.

Par exemple, elle soulève de suite la question de savoir si l'espace traversé par les lignes de force a les mêmes propriétés que le reste de l'espace. La découverte, faite par FARADAY, de l'induction électromagnétique, répondait à cette question ; elle démontrait, en effet que, lorsque les lignes de force magnétique traversent une région de l'espace, un anneau de fil qui s'y déplace est le siège d'un courant électrique, tandis qu'il ne se passe rien de semblable si l'anneau se meut dans l'espace normal.

MAXWELL était le type de mathématicien ayant le plus de chances de sympathiser avec la théorie de FARADAY, car, au début de sa carrière, avant de prendre ses grades, il avait manifesté ses préférences pour les méthodes géométriques plutôt que pour les méthodes analytiques. Le caractère géométrique de la théorie des lignes de force devait naturellement l'attirer.

Après une année de travail, il présenta à la *Société Scientifique* de Cambridge une communication sur « les lignes de forces de FARADAY », où il donnait aux idées de celui-ci une forme mathématique ; il soulignait l'analogie entre les lignes de force et « les filets d'eau » ou trajectoires des molécules dans un courant; l'intensité de la force électrique correspondant à la vitesse de l'eau.

Il montra, aussi, que dans les problèmes qui avaient été traités par les mathématiciens, la théorie des lignes de forces conduisait exactement aux mêmes résultats numériques que la théorie de l'action à distance, en sorte que la théorie de FARADAY bénéficiait aussi de l'ac-

cord avec l'expérience invoqué par Airy en faveur de l'ancienne théorie.

En accusant réception à Maxwell d'un exemplaire de sa communication, Faraday lui écrivait :

« Je ne dis pas que je me permets de vous remercier de ce que vous avez dit sur les « lignes de force », sachant que vous l'avez fait dans l'intérêt de la vérité scientifique; mais vous devez supposer que votre travail m'est agréable et m'encourage beaucoup dans ma manière de voir. »

« J'ai été d'abord presque effrayé de voir appliquer à la question une telle force mathématique, puis j'ai été émerveillé de constater qu'elle supportait si bien l'épreuve ».

Dans cette première communication, Maxwell traduit la théorie de Faraday en une langue intelligible aux mathématiciens et la rend ainsi accessible à une catégorie beaucoup plus large de lecteurs. Sa communication ne contient cependant aucun principe physique nouveau. Il n'en fut pas de même 5 ans plus tard, lors de ses communications sur les « lignes de force physiques », publiées dans le Philosophical Magazine. Il y décrit un modèle matériel de champ magnétique, destiné à montrer l'induction de courants électriques par la force magnétique. C'était une caractéristique de Maxwell : il concevait toujours des modèles.

Personne n'a jamais apprécié plus vivement que lui l'avantage que donne, pour concentrer la pensée et infuser des idées nouvelles, la considération d'un cas concret, tel qu'un modèle remplaçant l'emploi exclusif des symboles algébriques.

Il disait en 1870, dans une adresse à la *British Association* : « Dans l'intérêt des personnes douées de différents genres d'esprit, la vérité scientifique devrait être présentée sous des formes variées et regardée comme tout aussi scientifique quand elle revêt la forme robuste et les vives couleurs d'un modèle physique que quand elle a la ténuité et la pâleur d'une expression symbolique ».

Dans son modèle, Maxwell figure le champ magnétique par la rotation d'un certain nombre de cylindres égaux dont les axes sont parallèles à la force magnétique et dont la vitesse de rotation lui est proportionnelle.

La direction de la rotation détermine la direction de la force, en sorte que, partout où la force a la même direction, les cylindres tournent dans le même sens.

Mais une question se pose : Comment les cylindres doivent-ils être engrenés pour que ceci puisse se produire ?

S'ils l'étaient directement, les cylindres contigus tourneraient en sens opposé. Pour pouvoir admettre qu'ils tournent dans le même sens, MAXWELL supposa que chaque cylindre était séparé de son voisin par de petites billes sphériques se comportant comme des poulies folles, sans glissement sur les cylindres ; il supposait aussi que les billes correspondaient aux particules d'électricité et leur mouvement à un courant électrique.

Si les deux cylindres en contact avec l'une des billes tournent à la même vitesse, le centre de la bille reste au repos et elle tourne seulement autour de son centre. Si les deux cylindres ne tournent pas à la même vitesse, le centre de la bille se déplace dans la direction où l'entraîne le cylindre tournant le plus vite : ce qui correspond à un courant électrique.

Si, dans un champ d'abord uniforme, la vitesse de l'un des cylindres vient à varier (ce qui correspond à un changement de la force magnétique), une bille engrenant ce cylindre avec un autre ne se trouve plus entre deux cylindres d'égale vitesse et, par suite, elle se déplace (ce qui représente un courant électrique). Ainsi, le modèle reproduit l'induction d'un courant par la variation de la force magnétique.

Regardons maintenant le modèle à un autre point de vue. Supposons que les cylindres ne tournent pas et que nous appliquions aux billes une force qui les mette en mouvement; ceci mettra en rotation les cylindres qui sont en contact avec les billes, d'où production d'une force magnétique.

Dans un corps conducteur, les particules d'électricité peuvent se mouvoir sous l'action d'une force électrique constante, en sorte que cette force peut produire une force magnétique.

Dans un isolant toutefois, où nous pouvons supposer que les particules d'électricité ne peuvent passer d'une molécule à l'autre, elles prendront, à l'intérieur des molécules, une position dépendant de l'intensité de la force électrique et toute variation de cette force les fera changer de place; les billes du modèle se mettront donc en mouvement et feront tourner les cylindres, ce qui produira encore une force magnétique.

Le modèle nous suggère donc que les *changements* de la force électrique, même dans un isolant, doivent produire une force magnétique, ce qui est le trait essentiel de la théorie de MAXWELL.

C'est un bon exemple de la manière dont un modèle, établi pour représenter un phénomène, peut en suggérer un autre. La conception et le développement de l'idée suggérée par ce modèle, constituent la plus importante contribution que MAXWELL ait apportée à la science électrique.

Dans sa communication sur « les lignes de force physiques », il développe, en suivant de très près son modèle, les conséquences de cette manière de voir et il donne l'essentiel de sa théorie, bien que sous une forme quelque peu approximative.

Quand, dans une communication ultérieure, il revient à son sujet, il ne parle plus du modèle qui avait rempli son rôle en lui suggérant l'existence d'un nouveau phénomène. Maintenant, il admet l'existence de ce dernier et il l'exprime par des équations mathématiques qui sont, en substance, les équations bien connues de MAXWELL ; ce sont les plus importantes de la physique.

L'importance du pas franchi par MAXWELL est indiquée par le fait que, d'après les vues qui prévalaient lorsqu'il fit sa publication, les ondes électriques ne pouvaient exister, tandis que, d'après sa théorie, elles accompagnent tout changement affectant les forces électriques et magnétiques.

Il est intéressant de remarquer la symétrie existant entre la loi de FARADAY sur l'induction électro-magnétique et la théorie de MAXWELL. Suivant la loi de FARADAY, une variation de la force magnétique produit une force électrique ; d'après la théorie de MAXWELL, une variation de la force électrique produit une force magnétique.

Nous passons de FARADAY à MAXWELL, en interchangeant les quantités électriques et magnétiques.

Prises ensemble, ces deux théories forment, pour une grande part, la base de la science électrique. L'une et l'autre sont nécessaires et, bien souvent, suffisantes, pour résoudre les problèmes posés par cette science; où l'une s'applique, l'autre s'applique aussi.

Il semblerait que la nature elle-même ait réuni, par un lien indestructible, les noms de FARADAY et de MAXWELL.

La considération des propriétés des lignes de forces électriques de FARADAY, lorsqu'elles se déplacent, conduit de la manière la plus simple et la plus directe à la théorie de MAXWELL. Quand une charge électrique se déplace, les lignes de force qui en partent se déplacent aussi, en sorte que, dans l'espace entourant la charge, les lignes de force sont en mouvement.

Nous savons d'ailleurs qu'au travers de cet espace, il existe des

forces magnétiques; en sorte que le mouvement des lignes de force électriques produit une force magnétique.

Considérons un espace dans lequel la force électrique varie : le nombre des lignes de force électriques doit y varier aussi. Ces lignes ne peuvent être toutefois, ni créées, ni détruites, de sorte que, si le nombre des lignes de force en une région vient à changer, c'est nécessairement que des lignes y ont été introduites ou en sont sorties.

Ceci implique un déplacement des lignes et, par suite, nous l'avons vu, une force magnétique; ainsi, toute variation de la force électrique doit être accompagnée d'une force magnétique et c'est la théorie de MAXWELL.

Les lignes de force

Les lignes de force électrique furent introduites par FARADAY pour représenter l'état d'un champ électrique dans lequel ces lignes sont au repos.

Quand elles se déplacent, elles acquièrent des propriétés nouvelles; il aurait pu arriver que si leurs propriétés, au repos, représentaient bien les phénomènes du champ électrique fixe, leurs propriétés en mouvement ne puissent nullement représenter les nouveaux phénomènes, tels que la production de forces magnétiques, l'induction électro-magnétique et autres, qui se produisent dans un champ variable.

Il semble bien évidemment résulter du caractère fondamental des lignes de force, que les propriétés qu'elles acquièrent en se déplaçant, correspondent aux phénomènes accompagnant les variations des champs électrique et magnétique.

J'estime que cette conception des lignes de force fut un des plus grands services que FARADAY ait rendus à la science, qu'elle nous a fourni la méthode la plus simple, la plus efficace et la plus suggestive que nous possédions pour représenter les phénomènes qui se passent dans le champ électro-dynamique.

La conséquence la plus frappante de la théorie de MAXWELL est que les variations des forces électrique et magnétique se propagent sous forme d'onde. La vitesse de propagation de ces ondes, calculée en partant de quantités purement électriques, est la même que la vitesse de la lumière.

Ceci conduisait naturellement à admettre que les ondes lumineuses sont des ondes de forces électrique et magnétique.

Faraday, il est intéressant de le noter, avait en 1846, émis l'hypothèse que la lumière pouvait être due aux oscillations des lignes de force électrique, mais il n'a pas poursuivi plus loin cette suggestion.

Pendant longtemps, la théorie de Maxwell n'a reçu qu'un faible appui et ce n'est qu'un quart de siècle après sa publication et près de 10 ans après sa mort, que l'existence des ondes électriques a été mise directement en évidence.

Pour l'étude de ces ondes au Laboratoire, deux choses sont nécessaires : un moyen de les produire et un moyen de les détecter une fois produites.

La première condition n'était pas gênante, les oscillations produites par la décharge d'un condensateur devant produire des ondes, si la théorie est exacte.

Mais la difficulté était de les détecter.

Les forces transmises par les ondes changent de sens environ un million de fois par seconde et l'effet d'une force de direction donnée est de suite détruit par une force de direction opposée qui suit immédiatement la première; la somme totale des effets produits est donc nulle.

Nous disposons maintenant d'appareils qui ne livrent passage à ces forces que dans un seul sens, en sorte que seules des forces de même signe peuvent passer.

Ce sont ces appareils qui ont rendu possible la télégraphie sans fil à longue distance, mais ils ne furent inventés que longtemps après la mort de Maxwell.

Le problème fut finalement résolu par Hertz, qui détecta les ondes au moyen de l'étincelle électrique; celle-ci, tout en exigeant pour jaillir, une force intense, ne dure qu'un temps très court, beaucoup moins de 1/1 000 000ᵉ de seconde dans des conditions favorables ; ainsi une étincelle produite par une force d'une direction donnée a fini de passer avant que la force de direction opposée soit venue interférer avec la première.

En observant la modification subie par ces étincelles quand on les déplace d'un endroit à un autre, Hertz établit l'existence des ondes électriques et montra que, comme les ondes lumineuses, elles peuvent être réfléchies, réfractées, condensées en un foyer, polarisées et interférer entre elles.

Les expériences de Hertz sont parmi les plus remarquables de l'histoire de la physique. Bien qu'il ait dû employer une méthode très difficile, il arriva, grâce à son habileté expérimentale, à son ingénio-

sité et à sa circonspection, à découvrir les ondes électriques et à vérifier, 10 ans après la mort de Maxwell, l'exactitude de sa théorie.

La découverte des ondes électriques, conséquence de la théorie de Maxwell a eu, comme la découverte de l'induction électromagnétique par Faraday, une influence profonde sur notre civilisation.

Elle a étendu la portée de la parole humaine, de telle sorte que tous les habitants du monde ont été mis à une distance les uns des autres où ils peuvent s'entendre. Il est peu d'hommes dont la vie n'ait pas été affectée par les découvertes de Faraday et de Maxwell. Leur travail patient dans la recherche de la vérité scientifique a eu plus d'influence que les parlements ou les armées, sur le bien-être de l'humanité et sur les progrès de la civilisation.

LES SUCCESSEURS DE FARADAY

LES SAVANTS ET LEURS OEUVRES

La continuation d'une grande tradition

par le Professeur W. M. THORNTON, D. Sc.

Nous constatons aujourd'hui, en lisant la littérature scientifique du début du XIXe siècle que, étant donnée la direction vers laquelle se portait, à cette époque, la pensée des chercheurs, la découverte de l'induction électromagnétique ne pouvait plus guère, sans doute, se faire longtemps attendre.

Il était juste que l'honneur en revint à FARADAY, car cette découverte n'est, en elle-même, qu'une simple conséquence de ses propres travaux antérieurs, n'exigeant pour être dégagée, que la simplicité du génie. Ses idées furent développées par ses contemporains, (lui-même ne s'en étant plus guère occupé) dans deux voies distinctes, mais étroitement liées, celle de brillantes recherches physiques que les développements mathématiques accompagnaient de près et celle des applications, réalisées pas à pas par toute une lignée de penseurs originaux.

Les problèmes d'électrostatique exerçaient un attrait irrésistible sur les mathématiciens et l'étude de cette branche particulière atteignit bientôt un niveau élevé.

POISSON avait montré le chemin; WILLIAM THOMSON, depuis Lord KELVIN, appelé souvent le « POISSON » de l'Angleterre, bien qu'il ne fut guère alors qu'un adolescent, non seulement élargit le domaine de la science par une série de communications d'une puissante originalité, mais de plus, apercevant dès ses premières études, l'analogie des lois qui régissent les flux de chaleur et d'électricité, il posa les fondements de la théorie générale du mouvement des charges électriques.

THOMSON, comme FARADAY, était un homme de tempérament ardent et enthousiaste. Il fut, comme il le disait, « inoculé du feu de FARADAY » par DAVID THOMSON, cousin de FARADAY, de l'*Université de la Trinité* à Cambridge et qui occupa plusieurs années la chaire de

Sciences naturelles de Glasgow ; si nous nous demandons quelle est la manière dont se transmet le génie, nous constatons que ce fut, en partie, de WILLIAM THOMSON que MAXWELL reçut à son tour l'inspiration.

Lorsque les ingénieurs du premier câble transatlantique rencontrèrent certaines difficultés, THOMSON parvint à poser et à résoudre les équations de la transmission des signaux et à indiquer la voie à suivre pour traiter les problèmes pratiques qu'elle posait. C'est à lui surtout qu'est dû le succès de la télégraphie sous-marine.

De fait, il avait le génie d'apercevoir comment une relation déduite d'un raisonnement abstrait pouvait conduire à un but pratique. Bien longue est la liste de ses inventions en électricité, qui nous apparaissent comme une solution trouvée sans effort à de difficiles problèmes pratiques. Le galvanomètre de marine à miroir, le siphon enregistreur, les voltmètres électromagnétiques, les balances de courant et de tension, pour n'en mentionner que quelques-unes, témoignent de ses dons extraordinaires.

« La laborieuse humilité » de KELVIN, pour employer l'heureuse expression de Lord ROSEBERRY, est l'un des attributs d'un génie supérieur qui, « en faisant ce qu'il doit », se révèle souverain. Ce fut THOMSON qui institua, au bénéfice de ses élèves, le premier laboratoire universitaire de physique en Angleterre et ce fut seulement quand la science de l'électricité commença à recueillir les fruits de cet enseignement de laboratoire, qu'elle prit vraiment conscience d'elle-même.

En dehors de son habileté transcendante en physique mathématique, KELVIN peut être justement regardé comme le premier des grands ingénieurs électriciens. C'est en grande partie grâce à son œuvre que l'art de ces ingénieurs diffère de celui de tous leurs collègues, car il en dégagea les lois physiques systématiques longtemps avant que les praticiens aient saisi la signification des phénomènes.

Théories mathématiques.

JAMES CLERK MAXWELL était à Cambridge quelques 10 années après THOMSON et il adopta, dans une large mesure, la même brillante devise révélatrice du même sens physique : « des mathématiques, oui, mais des expériences d'abord. » Dans la préface de son grand traité de l'électricité et du magnétisme, publié en 1873, il écrivait : « J'ai décidé de ne lire aucun travail mathématique sur la question, avant

d'avoir étudié les « Experimental researches on electricity » de FARADAY... ; en progressant dans l'étude de FARADAY, j'ai reconnu que sa méthode de concevoir les phénomènes était aussi une méthode mathématique... enfin, j'ai trouvé que ces méthodes pouvaient être présentées sous les formes mathématiques ordinaires ».

La manière dont il y parvint constitue l'un des triomphes de la physique mathématique. Il fut amené ainsi à la théorie dynamique de l'action électrique, aboutissant, dans son fameux chapitre XX, à la théorie des radiations électriques qui, vérifiée expérimentalement par HERTZ et LODGE, conduisit à son tour à l'invention de la radiotélégraphie et de la radiotéléphonie. La grande contribution de MAXWELL à la science électrique fut aussi féconde dans ses effets que la découverte, par FARADAY, de l'induction magnéto-électrique ; elle nécessitait, pour sa complète mise au point, la combinaison de cette dernière avec ce que THOMSON appelait « la découverte de FARADAY si longtemps négligée et discréditée, bien que fondamentale », de la capacité inductive spécifique ; jointe à la nature du champ électrique dans un isolant, elle constitue l'essence même de la théorie des courants de déplacement ; c'est cette conception d'après laquelle, si on établit une différence de potentiel, de champ, ou de contrainte électrique, entre deux plans opposés, séparés par un milieu isolant, il se produit un déplacement ou un mouvement du milieu, proportionnel à la différence de potentiel, déplacement dont la vitesse est précisément le courant parcourant le circuit.

Grâce à son sens physique aigü et à son habileté mathématique, MAXWELL put cristalliser les conceptions de FARADAY en formules de la plus large portée, et fraya le chemin aux étude modernes et plus générales encore sur les phénomènes électriques.

Tandis que THOMSON et MAXWELL avaient établi les théories mathématiques qui ont joué un si grand rôle dans les communications internationales sous-marines et en radio-télégraphie, JAMES PRESCOTT JOULE avait, dans son laboratoire de Manchester, étonné le monde scientifique en démontrant que l'énergie dissipée, en frottement par exemple, avait un équivalent numériquement exact dans la chaleur produite; que la chaleur et le travail sont des formes interchangeables de l'énergie, quelles que puissent être leurs variations. JOULE, qui était brasseur, avait été l'élève de JOHN DALTON à une époque où la théorie atomique de ce dernier était généralement acceptée. Il devint en physique un expérimentateur de premier ordre, faisant preuve de beaucoup

d'intuition et de précision dans les recherches. Au début, personne ne voulut l'écouter. Ses notes furent refusées par les Sociétés scientifiques. Plusieurs années de discussions furent nécessaires pour convaincre THOMSON lui-même; mais lorsque l'exactitude de ses conclusions fut reconnue, une nouvelle lueur fut projetée sur les sciences physiques, comparable, disait THOMSON, à la loi de gravitation de NEWTON. La technique de l'ingénieur, dépassant la mécanique appliquée, pénétrait dans le large champ de la physique.

L'influence indirecte de JOULE sur l'électro-technique fut profonde. Le rendement des générateurs et des moteurs électriques se calcule sur ses conclusions. Il fit, pour les machines électriques, ce que CARNOT avait fait pour les machines à vapeur; il indiqua le rendement à en attendre dans des conditions de travail données.

JOHN WILLIAM STRUTT, troisième baron RAYLEIGH, successeur de MAXWELL dans la chaire de Physique de CAVENDISH, « Senior Wrangler and Smith's Prizeman », hérita de la tradition newtonienne en physique expérimentale et en mathématiques.

Si MAXWELL n'avait accepté l'invitation de prendre la chaire de CAVENDISH, RAYLEIGH en aurait été le premier occupant. La valeur principale de ses recherches électriques, pour les physiciens et les ingénieurs, est dans l'exactitude et le caractère fondamental de son œuvre sur les unités électriques. Le Comité de la *British Association* avait beaucoup fait en cette matière ; mais une nouvelle science venait au jour, comportant d'importantes conséquences pratiques et il était essentiel que les unités de mesure de résistance (l'ohm), de courant (l'ampère), et de tension (le volt), fussent connues au moins au millième près. RAYLEIGH exécuta sur chacune de ces unités une remarquable série de mesures, jusqu'à une précision voisine du dix millième ; les méthodes qu'il employait étaient remarquables, non seulement pour leur intérêt scientifique, mais aussi par la manière dont il les appliquait.

Le deuxième pas accompli comme conséquence des découvertes de FARADAY fut, immédiatement après, la construction de petites machines magnétos pour produire des courants électriques. FARADAY lui-même employait une machine de ce genre construite par PIXII et munie d'un commutateur en deux pièces permettant d'obtenir un courant de direction unique. De nombreuses variantes furent bientôt réalisées, mais ce ne fut qu'un quart de siècle plus tard que SIEMENS,

en inventant l'armature en forme de longue navette et l'enroulement en série, augmenta grandement la puissance pouvant être fournie par la machine.

Tandis que les applications électriques sur une large échelle se développaient très lentement, leur emploi en signalisation s'accrut rapidement.

Charles Wheatstone devint professeur de Physique expérimentale au *King's College*, à Londres, quelques années après la découverte de Faraday. C'était un homme d'une fertilité d'invention immense, qu'avait attiré de bonne heure la possibilité de transmettre électriquement des signaux alphabétiques et c'est de ses appareils qu'est sorti le télégraphe électrique moderne.

Un an après sa nomination, il réalisa, avec Cooke, un télégraphe à cinq fils et à cinq aiguilles, puis finalement un système à un seul fil et à une seule aiguille. En même temps, Morse introduisait son nouceau code universel et son résonateur double de courant pour signaux auditifs.

Wheatstone occupa, à l'époque, un rôle important dans le monde des électriciens. Ses communications à la *Royal Society*, en 1843, sont classiques. Il fit, entre autres inventions, celle du rhéostat, et travailla assidûment la question des bobines de résistance. Son nom se prononce quotidiennement toutes les fois qu'il nous faut mesurer une résistance électrique. L'introduction par lui du dispositif de Christie pour la mesure des résistances, le fameux pont de Wheatstone, ainsi appelé à cause de sa ressemblance, dans les premiers croquis qui en furent faits, avec les ponts de bois bien connus figurant sur les porcelaines chinoises, apporta au matériel des électriciens une des plus précieuses améliorations. Wheatstone peut être, avec justice, qualifié de grand ingénieur et c'était, sans aucun doute, un excellent physicien.

Parmi les nombreux physiciens qui participèrent aux premiers progrès de l'électricité, Latimer Clark occupe une place marquante. Les travaux qu'il fit en télégraphie sous marine le mirent en relation avec Thomson, dont il provoqua indirectement les recherches mathématiques sur la transmission des signaux le long d'un câble; il n'était pas d'ailleurs question de l'inductance, dont Heaviside montra l'importance quelques années plus tard. Clark fut associé à l'heureuse réalisation du câble transatlantique en 1866. Il était, à cette époque, membre du

Comité des Unités de la *British Association*, auquel Sir Charles Bright avait suggéré des noms d'unités peu différents de ceux actuellement en usage. Il est connu de tous les électriciens comme l'inventeur de la pile au mercure de Clark qui fut, pendant tant d'années, le seul étalon constant de force électro-motrice, si utile à cette époque reculée du courant continu à basse tension, à laquelle le nom du Colonel Crompton est étroitement associé.

La télégraphie terrestre avait accompli un progrès remarquable grâce à l'invention du télégraphe imprimant de David Edward Hughes. Né à Londres, mais ayant longtemps habité l'Amérique, c'était un expérimentateur de génie, qui réalisa le premier la radiotransmission, huit ans environ avant Hertz, en décelant les ondes électriques à environ 400 m de leur origine.

Son souvenir restera, non pas tant en raison de son télégraphe imprimant, quelle que puisse être son importance, que par l'invention du microphone, en 1876. C'est, en effet, l'introduction de cet appareil qui rendit possible les communications téléphoniques.

La grande *Institution of Electrical Engineers* fut fondée, à l'origine, en 1871, sous le nom d'*Institution des ingénieurs télégraphistes*. Elle changea de nom en 1888 et on peut dire que cette date a marqué les débuts pratiques de la grande industrie électrotechnique moderne. Les deux raisons de cette transformation furent le rapide développement pris à cette époque par la dynamo et par le moteur à courant continu (peut être l'introduction du moteur à gaz comme moteur primaire exerça-t-elle une certaine influence), et l'invention de la lampe électrique à filament incandescent.

L'arc à courant alternatif était bien connu en 1870. Il fut employé constamment pendant le siège de Paris. La bougie Jablokhoff permit, entre 1875 et 1880, de dissiper les ténèbres sur les quais de la Tamise ; quand, quelques années plus tard, Joseph Wilson Swan lança sa lampe à filament de carbone incandescent, chacun put constater que cette source réalisait, pour l'éclairage intérieur, ce qu'avait fait la lampe à arc pour celui des rues. Ces deux sortes de lampes exigeaient une puissance très supérieure à celles que les ingénieurs télégraphistes étaient accoutumés à manier et une nouvelle classe d'électriciens apparut, qui comptaient en chevaux et en kilowatts, alors que leurs prédécesseurs ne parlaient que de piles et de milliampères.

SWAN, ayant combiné son invention avec celle d'EDISON, inonda le monde de lumière électrique. Ses principales contributions à la science sont, avec sa lampe, la photographie indélébile au carbone, le papier sensible au bromure, les accumulateurs au plomb compartimentés et les filaments en cellulose filée, qui ont donné naissance à l'industrie de la soie artificielle. SWAN était surtout un chimiste, bien qu'il ait fait un grand nombre d'expériences en électricité, mais il est indubitable que ses travaux donnèrent une impulsion immense à la distribution d'énergie électrique; en fait, ils firent naître la fourniture de puissance motrice qui prit avec le temps, son développement actuel.

En tête de ce dernier progrès, nous trouvons deux hommes éminents, JOHN HOPKINSON et SEBASTIEN ZIANI de FERRANTI. Stimulé par les succès que remportait KELVIN dans la solution des problèmes électriques pratiques, HOPKINSON qui était « Senior Wrangler and Smith's prizeman », avait appliqué ses remarquables talents à résoudre des problèmes nouveaux et aussi pressants qu'avaient été ceux du câble transatlantique et qui se posaient pour la construction des nouvelles machines dynamo-électriques, ou dynamos, comme KELVIN les appelait ; celles-ci trouvaient leurs applications dans le domaine pratique. HOPKINSON était un homme de grande vigueur de corps et d'âme ; son père, ingénieur connu à Manchester, lui avait donné dès le début une instruction plus pratique que livresque. Directeur, à vingt-trois ans, de la verrerie de Chance, de Birmingham, il travailla d'abord à l'équipement des phares. Il inventa le système à feux groupés, qui permet actuellement de les identifier. THOMSON s'y intéressa, et HOPKINSON subit son influence. Les communications remarquables sur les diélectriques, par lesquelles il commença et finit sa carrière scientifique, sont surpassées en intérêt par ses recherches sur les principes de l'établissement des circuits magnétiques dans les machines. Lui-même, avec son frère EDWARD, réalisa en 1886, pour le circuit magnétique, ce que OHM avait fait, cinquante ans plus tôt, pour le circuit voltaïque. C'était un progrès de premier ordre. Si Lord KELVIN fut le plus grand ingénieur électricien scientifique, JOHN HOPKINSON fut son digne second.

Tandis qu'HOPKINSON, en montrant comment l'on devait construire et essayer les machines, s'imposait à la reconnaissance éternelle des ingénieurs électriciens, de FERRANTI, avec son génie pratique, leur ap-

prenait à transmettre l'énergie par courants alternatifs à haute tension. Après quelques années passées au Collège de l'Université, il entra aux Ateliers SIEMENS à Charlton, en 1881, au moment même où apparaissait la lampe SWAN. Quatre ans plus tard, lorsqu'il fit breveter son transformateur, l'industrie des lampes était bien assise et, pour fournir l'énergie nécessaire à l'éclairage, il inaugura sa brillante carrière dans les courants alternatifs. Il construisit des machines, des câbles, des transformateurs, de l'appareillage ; les meilleurs isolants pour les câbles à 10 000 V étaient alors, d'une part le papier brun, de l'autre, un sous-produit de la fabrication des chandelles de cire. Beaucoup de ces câbles étaient encore en exploitation, après trente-cinq ans de fonctionnement constant.

Le fameux problème posé par la résonance des câbles de Deptford reçut d'HOPKINSON sa solution mathématique. L'étude de ce problème exigeait — comme tout autre problème d'électrotechnique — pour se rendre maître de phénomènes nouveaux et fondamentaux, à la fois l'habileté du savant, l'intuition et l'instinct pratique de l'ingénieur électricien.

La radiodiffusion mondiale et la transmission triphasée de l'énergie constituent les dernières phases de la succession de FARADAY, l'une dans la science, l'autre, dans l'art de l'ingénieur.

L'EXPLORATION DE L'ÉTHER

LE CHAMP MAGNÉTIQUE ET LA LUMIÈRE

L'action à distance

par Sir Oliver LODGE, F. R. S.

Les vues de FARADAY sur l'éther remplissant l'espace furent, sans aucun doute, influencées par celles de son prédécesseur THOMAS YOUNG, qui, lui-même, devait beaucoup à NEWTON. FARADAY, cependant, était si profondément plongé dans l'étude des phénomènes, qu'il ne pouvait s'empêcher de se former des idées personnelles. Il insistait, avec force, sur l'importance de ce qu'on appelle l'espace vide touchant et enveloppant les corps électrifiés ou magnétisés. On peut dire qu'il fut le premier à apercevoir clairement l'importance du rôle joué par le vide dans tous les phénomènes et à démontrer qu'un corps qui agit à distance le fait en modifiant le milieu tout autour de lui. L'introduction d'une matière pondérable dans l'espace ne fait que modifier ou, peut-être, nous aider à nous représenter, ce qui occupait cet espace auparavant. Pour expliquer le diamagnétisme, il reconnaît la nécessité d'admettre que certaines substances ont moins de perméabilité, comme nous le dirions maintenant, que l'espace vide. Il compare les lignes de force aux rayons lumineux et il ne peut accepter l'idée qu'un aimant dans le vide soit dans un état « d'obscurité magnétique ».

FARADAY put montrer que, bien souvent, l'introduction d'un corps matériel dans l'espace entourant une bobine ou un aimant ne produit pas de modification appréciable du champ magnétique, sauf si la substance introduite est elle-même magnétique. Ses recherches sur ce sujet sont contenues dans la section 1709-1736, vers la fin du volume I de ses « Experimental Researches ». Dans cette partie ancienne de ses comptes rendus, il se borne à enregistrer des faits observés, sans en rechercher les causes. Sa formation de chimiste et son instinct naturel le poussaient à admettre que tout phénomène suppose l'existence de corps matériels ; il lui fallut faire des essais répétés pour se con-

vaincre qu'une matière ne produit souvent, par elle-même, aucun effet et que, dans aucun cas, sa présence n'est essentielle, qu'elle soit isolante comme la gomme laque ou le soufre, ou bonne conductrice comme le cuivre.

En d'autres termes, l'influence inductive qu'il avait lui-même découverte, se transmet à travers l'espace vide. Il concevait cependant ce phénomène comme résultant des efforts et des contraintes existant dans le milieu et qu'il représentait par ses lignes de force. Ainsi il fut amené, comme nous le sommes encore, à admettre l'existence d'un milieu éthérique d'une nature quelconque, capable de supporter ces efforts et ces contraintes.

Je note, incidemment, qu'il imagine un dispositif exactement analogue en principe à la balance d'induction de Hughes, et qu'il manifeste une vive surprise en constatant qu'un corps conducteur tel que le cuivre, dans lequel des courants induits ont dû se produire, ne modifie pas l'induction magnétique finalement transmise à travers ce corps. Il suppose cependant et avec raison, que le temps pouvait intervenir, ce qu'il n'avait pu observer en raison de la paresse de son galvanomètre détecteur. Il établit ceci clairement, dans la section 1730. S'il avait disposé d'un téléphone capable de suivre exactement les fluctuations instantanées du courant, il aurait réalisé la balance d'induction de Hughes, dès cette époque reculée de 1838.

Guidé par des expériences de ce genre et par une multitude d'autres que nous avons tendance à oublier maintenant, parce que nous avons reconnu qu'elles devaient forcément donner des résultats négatifs (mais qu'il devait cependant toutes tenter alors, pour être sûr de n'avoir rien négligé de ce que les instruments pouvaient lui montrer), Faraday commença à méditer sur un phénomène connu pour être transmissible dans le vide, celui des rayons lumineux et à se demander quelle relation ces rayons pouvaient avoir avec ses lignes de force. Il fut amené à considérer que ces lignes existaient, non seulement dans un champ magnétique ou électrique, mais aussi dans le champ de gravitation. Il ne pouvait échapper à sa conviction instinctive de l'existence d'une relation entre les diverses forces. Il eut le bonheur de découvrir une de ces relations, à une époque où aucune théorie n'indiquait l'existence d'un phénomène de ce genre.

Il trouva qu'un champ magnétique imprimait une rotation à la lumière envoyée suivant ses lignes de force.

Il rechercha aussi l'effet que pouvait produire l'application d'un champ magnétique à une source lumineuse ; mais les instruments

dont il disposait n'étaient pas adéquats ; la découverte fut faite longtemps après, par ZEEMAN, et fut immédiatement comprise par les mathématiciens LARMOR et LORENTZ. Le Dr JOHN KERR réussit aussi, grâce à des expériences magnifiquement conduites, à couronner les découvertes de FARADAY par deux autres relations, qui portent son nom, entre le magnétisme, l'électricité et la lumière.

Le phénomène encore plus ténu qui manifesta enfin une relation entre la gravitation et la lumière, échappa complètement à FARADAY, malgré les recherches ardentes qu'il poursuivait en vue de découvrir une influence quelconque de la gravitation sur les phénomènes électriques, magnétiques ou lumineux. Ce phénomène échappa aussi à tous les expérimentateurs contemporains et il ne céda enfin qu'au génie mathématique du Professeur EINSTEIN.

Le fait que FARADAY n'acquit que graduellement la conviction complète qu'un milieu continu intervient pour transmettre les forces entre les particules matérielles, résulte clairement du rappel des étapes successives qu'il dut franchir, d'abord en électricité, puis en magnétisme (voir son premier travail au volume 1er, 1613-1616, 1663, 1710 et 2443) ; mais il se demandait si ses lignes de force ne se prêtaient pas mieux qu'un milieu uniforme à la transmission des vibrations ; en d'autres termes, il aperçoit que l'éther doit avoir une structure et n'est pas assimilable à l'air ou à l'eau. Il exprime cette manière de voir dans une lettre à PHILIPS, intitulée: « Réflexions sur les vibrations des rayons », de mai 1846. Non seulement il reconnaît l'utilité des lignes de force, mais il insiste sur la réalité de leur nature physique et il souligne leur existence autour des courants aussi bien qu'entre les pôles magnétiques. Il parle aussi, dans le n° 3301, de l'hypothèse d'EULER d'après laquelle « le fluide magnétique ou éther se déplacerait à la manière de filets liquides à l'intérieur des aimants et à travers l'espace et les substances qui les entourent ». Il parle aussi de lignes d'énergie dans l'aimant et dit qu'elles pourraient également être considérées, soit comme « des courants, soit comme des vibrations propagées, soit comme des ondes stationnaires, soit comme un état de tension ». Il cite, en l'approuvant, la théorie de NEWTON sur l'impossibilité ou l'absurdité de l'action à distance en l'absence d'un milieu de transmission et il dit que « même la gravité ne peut se transmettre et produire un effet à distance, s'il n'existe pas un agent interposé, satisfaisant aux conditions d'une ligne physique de force. »

Un de ses arguments est la courbure intrinsèque des lignes de force qui diffèrent, à ce point de vue, des rayons lumineux. Un autre est

basé sur le courant qu'elles induisent dans un circuit qui les coupe. « Le simple fait du mouvement ne peut produire ce courant : il doit exister autour de l'aimant et sous son action, une condition ou un état physique, où le fil a pénétré, et ceci montre bien la constitution physique des lignes de force magnétiques. »

Mais de quelle espèce peut être la substance ou l'agent qui remplira ces conditions et produira le résultat observé ? Il n'en a pas l'idée, et il s'abstient de toute hypothèse. En réalité, il se montre plutôt moderne dans la conclusion d'une note des Proceedings de la *Royal Institution* de juin 1852, où, avec précautions, il parle de l'espace : « La réponse à la question de savoir si l'existence d'un milieu matériel est indispensable à l'établissement de la force magnétique, dépend de ce que nous entendons par le terme de matière. Si ce terme ne doit s'appliquer qu'aux substances pondérables, ou soumises à la gravitation, la matière n'est pas plus essentielle pour les lignes physiques de force magnétique, que pour les rayons de lumière ou de chaleur ; mais si. en supposant l'existence de l'éther, nous admettons qu'il soit une espèce particulière de matière, alors les lignes de force pourront dépendre de quelque fonction de cet éther. L'expérience nous montre que l'espace pur est magnétique; mais alors la notion de l'espace pur doit inclure celle de l'éther, quand on envisage cette hypothèse ; ou si, dans l'avenir, quelque autre conception se fait jour sur l'état ou sur les propriétés de l'espace, on ne devra pas perdre de vue ce que nous appelons actuellement l'espace pur, d'après nos données expérimentales.

D'autre part, c'est, je crois, un fait établi, que la matière pondérable n'est pas essentielle à l'existence des lignes physiques de force magnétique ».

Ceci signifie, ou du moins nous pouvons aujourd'hui lui donner ce sens, que l'on peut décrire des expériences et faire des calculs sans s'attacher à aucun détail des propriétés de l'espace, c'est-à-dire sans mentionner l'éther ; mais que la conception d'un milieu de transmission impalpable d'une nature quelconque devient nécessaire dès que nous commençons à spéculer sur les détails physiques du phénomène étudié.

LE LIVRE DE NOTES DU LABORATOIRE

L'HISTOIRE D'UNE RECHERCHE

Le Journal qui va être imprimé.

par Thomas MARTIN

FARADAY avait l'habitude, lorsqu'il travaillait dans son laboratoire de la *Royal Institution*, de rédiger des notes sur ses expériences au fur et à mesure de leur exécution. Pendant tout le temps qu'il poursuivit son travail scientifique original, il prit ainsi, avec le plus grand soin, des notes très complètes auxquelles il avait coutume de se reporter constamment quand il préparait ses publications.

Sa première communication sur une analyse de chaux caustique, que Sir HUMPHRY DAVY lui avait demandé d'entreprendre, parut en 1816 ; il avait alors 25 ans ; sa dernière expérience, la recherche d'une action du champ magnétique sur le trajet d'un rayon lumineux, fut faite le 12 mars 1862. Les notes qu'il prit au cours de cette période, sauf celles des quatre premières années, ont été conservées à la *Royal Institution*. Elles contiennent le premier compte rendu manuscrit de tout son travail expérimental entre 1820 et 1862 sauf, seules exceptions notables, les comptes-rendus de ses premières recherches sur le verre d'optique et sur les alliages d'acier. Les communications originales relatives au verre sont la propriété de la *Royal Society*, ayant été préparées sous la direction d'un Comité de cette Société dont FARADAY était membre. Quant aux recherches sur les aciers, elles avaient été complètement terminées avant 1820.

Ce sont les notes sur les expériences faites de 1820 à 1862 qui constituent le Journal de FARADAY, titre sous lequel son manuscrit est, aujourd'hui, généralement connu.

Elles remplissent deux petits livres in quarto se rapportant aux premières années et 8 volumes in folio pour la période de 1831 à 1862. En 1831, il commença à employer de simples feuilles de papier écolier au lieu de carnets de notes reliés et à numéroter chaque paragraphe. Les feuilles étaient reliées en volume, avec la date en tête de chaque page ;

après quelques courtes séries de paragraphes numérotés, il commence, dans le volume 2, une série s'étendant à l'ensemble des autres volumes et contenant plus de 16 000 numéros. A la mort de FARADAY, en 1867, la totalité de ces notes manuscrites devint la propriété des directeurs de la *Royal Institution*, à qui FARADAY les légua ; elles sont toujours restées, depuis, dans cette bibliothèque. Il en a été fait, de temps à autre, des extraits par BENCE JONES et d'autres, mais elles n'ont jamais été publiées.

A la fin de l'été et à l'automne de 1831, FARADAY établit les principes de la production de l'électricité par le magnétisme. Son premier résultat est noté le 29 août 1831 ; ceux obtenus au cours des semaines suivantes furent communiqués à la *Royal Society* dans la première et la seconde série des Recherches expérimentales sur l'électricité.

Le Journal relate ses expériences exactement comme elles ont été faites. Pour célébrer le centenaire de la plus grande découverte de FARADAY, les Directeurs de la *Royal Institution* ont décidé de publier intégralement son Journal. Cette publication occupera 7 gros volumes, dont le premier sortira des presses au commencement de 1932.

Le Journal de FARADAY est unique parmi les manuscrits scientifiques : s'il se présente sous forme d'un simple bloc-notes de laboratoire, contenant la description des méthodes expérimentales, accompagnées des dessins des appareils employés et de notes soigneusement prises sur les résultats obtenus, il représente, en fait, beaucoup plus. FARADAY lui confiait ses espoirs et ses craintes scientifiques, ses hypothèses et ses idées pour ses expériences ultérieures, ses observations fortuites. Dans les articles qu'il a publiés, nous retrouvons ces observations soigneusement émondées, revues et notées dans un langage assez précis, mais expressif, où il était passé maître. Dans la rédaction de son Journal, il fait souvent des fautes de grammaire. Ses expériences sont décrites dans l'ordre où elles furent réellement exécutées ; il les accompagne de commentaires, de questions qu'il se posait ; on y trouve assez souvent un accent de fierté. Nous pouvons suivre le développement graduel de ses idées, à mesure qu'il est conduit d'une expérience à l'autre, jusqu'à ce qu'il ait clairement établi, pour sa propre satisfaction, les généralisations qui constituent aujourd'hui les bases de toute la science.

Le premier volume du Journal imprimé présente un intérêt extraordinaire et une extrême variété. En mars 1823, FARADAY liquéfie des gaz ; en mai 1825, il isole une substance particulière qu'il prend d'abord pour du naphtol, mais qu'il reconnaît ensuite être du benzol

ou, comme il l'appelait, du bicarbure d'hydrogène. Il fait des expériences sur l'électro-magnétisme et, le jour de Noël 1821, il réussit à faire tourner, sous l'influence du magnétisme terrestre, un fil parcouru par un courant. C'est ce jour-là, raconte-t-on, qu'il amena sa femme dans son laboratoire pour voir l'expérience.

En août 1823, il était à Folkestone, regardant voler des mouettes « Comment ces oiseaux volent-ils, dit-il, et pourquoi ne pouvons-nous faire voler de même un homme ou une machine dans les mêmes conditions » ?

Il y a un grand nombre de commentaires et d'observations semblables et, dès le premier volume, on trouve la fameuse série d'expériences qui débuta par celle de l'anneau d'induction, le 29 août 1831.

ACIERS ET ALLIAGES

LE CONTENU D'UNE CAISSE CÉLÈBRE

Examen scientifique des échantillons.

par Sir Robert Hadfield, F. R. S.

Quoi qu'il soit généralement connu que Michel Faraday dépensa beaucoup de temps et de peine à préparer des alliages d'acier durant les premières années de ses travaux à la *Royal Institution*, la valeur et l'importance de ses recherches dans ce domaine ont été jusqu'ici sous-estimées. Dans sa notice nécrologique sur Faraday, figurant aux procès-verbaux de la *Royal Society*, Bence Jones va jusqu'à dire : « Les résultats que Stodart et Faraday présentèrent à la *Royal Institution*, en 1822, dans leur communication sur l'acier, n'avaient aucune valeur pratique et cette recherche, l'une des premières et des plus laborieuses qu'ait exécutées Faraday, tranche fortement sur tous ses autres travaux, car elle n'aboutit à rien. »

D'autres biographes de Faraday paraissent avoir souscrit à cette opinion mais, grâce à la bienveillante autorisation des directeurs de la *Royal Institution*, j'ai pu soumettre 79 échantillons pris parmi les aciers et les alliages fabriqués par Faraday, il y a plus de cent ans, à une étude complète, chimique, physique et mécanique, à d'autres essais encore. Les résultats de cette étude, complétés par des recherches aussi poussées que possible sur les conditions et les circonstances dans lesquelles travaillait Faraday, m'amènent à soutenir que les alliages d'acier obtenus par lui au cours des années 1819 à 1824, apportent une preuve nouvelle de son génie et de sa faculté de divination. Ils représentent, en fait, les débuts d'une recherche systématique et compréhensive dans ce domaine des alliages d'acier, où Faraday peut être, à juste titre, salué comme un pionnier. Si les alliages de Faraday n'ont pas trouvé d'application pratique durable, c'est que le milieu et l'état des connaissances métallurgiques générales à cette époque, ne permettaient ni leur développement, ni leur utilisation. Ainsi, on n'avait aucun besoin, dans la construction et dans la mécanique, des qualités

et des propriétés spéciales que nous recherchons aujourd'hui et que nous trouvons dans les alliages d'acier. Néanmoins, FARADAY fut le premier à reconnaître l'importance que présentait l'étude, sur une large base, des propriétés de ces alliages et on peut bien dire que, dans ce domaine encore, il fut un précurseur.

Je présente cette revendication, non à la légère, mais après avoir pesé tous les témoignages contemporains de quelque valeur ; après avoir fait, des échantillons de FARADAY, une étude complète, comportant l'emploi de toutes les ressources d'un laboratoire moderne de recherches ; après avoir recouru à mon expérience personnelle de cinquante années dans le domaine de la métallurgie des métaux ferreux, expérience qui, pendant toute cette période a porté, en grande partie, sur les alliages d'acier.

Les recherches étendues et laborieuses de FARADAY sur les alliages d'acier, lesquels ne comportaient pas moins de seize éléments différents et de quatre composés spéciaux, furent poursuivies, par lui de 1819 à 1824, alors qu'il avait de 28 à 33 ans. Elles se placent après sa nomination aux postes d'Assistant du Laboratoire et de la Section minéralogique et de Préposé aux appareils à la *Royal Institution*, en 1815, au retour de son voyage sur le continent avec Sir HUMPHRY DAVY, et avant sa nomination au poste de Directeur du Laboratoire, en 1825. Tous les échantillons « d'acier et d'alliages », comme il dit, faits par FARADAY, furent préparés dans le laboratoire de la *Royal Institution*; il fut le plus souvent assisté par M. JAMES STODART, F. R. S., fabricant d'instruments de chirurgie et de coutellerie, beaucoup plus âgé que lui et qui mourut en 1823, à l'âge de 63 ans.

L'aide de STODART

Sans aucun doute, FARADAY reçut une aide considérable de STODART, sous forme de conseils pratiques pour le travail de l'acier et peut être aussi pour le forgeage et la préparation de barres et d'outils d'essai, ou d'instruments fabriqués avec les alliages. Le nom de STODART figure le premier dans les titres des communications présentées à la *Royal Institution*, en 1820 et à la *Royal Society* en 1822, parce qu'il était l'aîné et, aussi, parce qu'il fut élu membre de la *Royal Society* en 1829, trois ans avant que FARADAY n'obtint cette distinction. Néanmoins, il ressort clairement des communications mentionnées, que le travail effectif de préparation des alliages fut exécuté, en premier lieu, par FARADAY lui-même, à la *Royal Institution*. Les

alliages. les plus intéressants furent fabriqués par plus grandes quantités aux aciéries de SANDERSON, à Sheffield, avec des matières que FARADAY préparait à la *Royal Institution* et qu'il envoyait par route à Sheffield, aux soins d'un représentant de confiance. Malheureusement, on ne peut trouver aucune trace des alliages fabriqués ainsi « massivement » parfois en lingots de 5 ou 10 kg. Certains d'entre eux paraissent avoir été employés pour confectionner des couteaux et des rasoirs et dans quelque but spécial, probablement pour la fabrication de coins, dans le Mint.

Certains échantillons, que l'on sait avoir été conservés depuis que FARADAY les a fabriqués, il y a quelques 110 ans, furent placés par lui dans une petite boîte de bois blanc, étiquetée de sa propre main : « Acier et alliages ». Ces échantillons, au nombre de 79, ne pesaient ensemble que 4 kg. Les directeurs de la *Royal Institution* ont bien voulu m'autoriser à prélever un fragment sur chaque échantillon, pour le soumettre à une étude et à des essais complets ; grâce à cela, j'ai pu dégager un grand nombre de renseignements intéressants et utiles et démontrer que FARADAY s'est révélé, en métallurgie, comme un chercheur d'une grande habileté et comme un pionnier ou un précurseur dans le domaine des alliages d'acier.

Durant les dernières années du XVIII^e^ siècle et les premières années du XIX^e^, les propriétés et la composition de l'acier indien avaient suscité beaucoup d'intérêt, non seulement en Angleterre, mais aussi sur le continent. Les plus beaux échantillons de cet acier paraissent avoir été supérieurs à toute autre matière utilisable alors pour la fabrication des instruments de chirurgie et des autres instruments tranchants de qualité supérieure. Le docteur HELENUS SCOTT envoya, de l'Inde, des échantillons de l'acier en question, à Sir JOSEPH BANKS, F. R. S., alors Président de la *Royal Society* et celui-ci en confia l'examen au D^r^ GEORGE PEARSON, F. R. S., qu'assistait M. JAMES STODART.

Les résultats de ces recherches furent publiés dans les Philosophical Transactions en 1795 ; on y lit que STODART considérait l'acier indien comme supérieur, pour de nombreuses applications, à l'acier alors employé en Angleterre. Il resta évidemment fidèle à cette opinion, car une de ses cartes commerciales, imprimée vers 1820, mentionne qu'après des essais comparatifs poursuivis pendant plusieurs années, il préférait l'acier indien au meilleur acier d'Europe pour la confection des instruments de chirurgie, rasoirs, couteaux, etc...

Ceci étant donné et si nous considérons l'étroite collaboration de

Faraday et de Stodart, nous ne pouvons être surpris que le premier ait, dans une certaine mesure, regardé l'acier indien comme un étalon de comparaison et même que, dans quelques-uns de ses essais, il ait cherché à le reproduire. Ses recherches sur l'acier et ses alliages étaient toutefois basées, dans l'ensemble, sur une conception beaucoup plus large.

En commençant ses recherches sur l'acier et les alliages, Faraday était tout d'abord préoccupé d'obtenir des matières supérieures à l'acier ordinaire au carbone, pour les couteaux, les instruments chirurgicaux et autres, ainsi que des alliages pouvant servir à faire de bons miroirs, non sujets à se rouiller ou à se ternir. C'est seulement pour ces applications que, à cette époque, le besoin se faisait sentir d'une matière supérieure à la fonte, au fer forgé ou à l'acier au creuset. Les aciers à coupe rapide, les aciers spéciaux pour chemins de roulements, les aciers au silicium pour tôles feuilletées de transformateurs, les aciers pour obus percutants contre les cuirasses, pour barres de fours spéciaux, pour soupapes, fait, tous les alliages d'acier utilisés aujourd'hui, étaient alors inexistants.

Il résulte des renseignements tirés des notes de Faraday et des recherches faites sur les 79 échantillons laissés par lui, qu'il réussit à obtenir quelques alliages supérieurs à l'acier ordinaire pour la confection des instruments, des outils tranchants et des miroirs. Il semble parfaitement possible que ces alliages eussent été utilisables dans l'industrie il y a déjà un siècle et il n'est pas douteux que des progrès ultérieurs importants eussent pu être accomplis, si les fabricants d'acier de cette époque avaient apprécié l'importance des travaux de Faraday et poursuivi, dans des conditions industrielles, les brillantes recherches que, dans son laboratoire et avec les plus modestes ressources, il avait exécutées avec tant de succès.

Comme je l'ai déjà mentionné, les échantillons d'acier et d'alliages que je viens d'étudier, ont été fabriqués par Faraday lui-même à la *Royal Institution*.

Les divers éléments, en proportions voulues pour la production des alliages binaires ou ternaires, étaient placés dans un creuset et fondus au « four soufflé ». Celui-ci consistait essentiellement en un feu de coke brûlant dans un foyer de terre. La combustion était poussée, à l'aide d'un soufflet à main, jusqu'à l'obtention de la haute température nécessaire.

Tous ces détails nous sont parfaitement connus par les descriptions qui en ont été laissées.

Le petit creuset, chargé du poids de métal à fondre, était plongé au milieu du feu, après avoir été obturé par un couvercle qui protégeait le contenu. On laissait refroidir, dans le creuset, le petit bouton d'alliage ainsi produit qui était ensuite forgé en barres, soit par FARADAY lui-même, soit peut-être par les couteliers de STODART, dans les ateliers situés derrière son établissement, au n° 401 du Strand, à Londres.

Grâce à la générosité du Dr WILLIAM HYDE WOLLASTON. F. R. S., FARADAY pouvait se procurer les métaux rares dont il avait besoin pour ses alliages, tels que platine, rhodium, palladium, osmium, iridium.

Ces opérations s'exécutaient à une échelle suffisante pour qu'on ait été amené à les transférer, du laboratoire de la *Royal Institution*, au « four du fabricant d'acier fondu » c'est-à-dire aux ateliers de MM. SANDERSON, à Sheffield, où des lingots pesant de 5 à 10 kg étaient coulés sous la surveillance d'un représentant de FARADAY, envoyé de Londres avec les matières préparées et pesées.

Il faut bien clairement comprendre que l'étude scientifique et technique faite par moi sur les échantillons de FARADAY, au Laboratoire de recherches de Hadfield, Sheffield, a porté sur des spécimens d'acier et d'alliages qui ont été, par bonheur, conservés exactement dans l'état où ils étaient en sortant des mains de leur fabricant, il y a plus de cent ans.

FARADAY, comme je l'ai dit, en plaça 79 dans une boîte de bois qu'il étiqueta, de sa propre main « acier et alliages, FARADAY ».

Sur ces échantillons, j'ai exécuté 428 analyses chimiques et un grand nombre d'examens métallographiques, d'essais mécaniques, physiques, de traitements thermiques ou autres.

Le plus volumineux de ces échantillons pesait 140 g et 66 ne pesaient en moyenne que 31 g.

Le poids total prélevé sur l'ensemble des échantillons pour les 428 analyses, n'a été que de 187 g.

Cependant, de cette faible quantité de matière, il a été possible de tirer un trésor de données qui, non seulement portent sur les qualités des alliages eux-mêmes, mais nous fournissent aussi des renseignements encore utiles aujourd'hui.

Après l'achèvement complet des divers essais, chimiques et autres, il restait encore 3 287 g d'échantillons originaux, les prélèvements nécessités par l'étude entière n'ayant absorbé que 595 g.

Les connaissances en chimie comme en métallurgie n'étaient guère sorties de l'enfance au temps de FARADAY.

L'analyse quantitative, telle qu'on la pratique aujourd'hui, n'était pas encore connue et, dans toutes les notes de FARADAY sur l'acier et ses alliages, on ne trouve pas une seule analyse des produits qu'il obtenait.

On admettait que l'alliage renfermait les éléments constitutifs dans la proportion même où ils avaient été mis au creuset.

Les analyses chimiques faites par l'auteur, qui ont permis, dans la plupart des cas, de retrouver au moins 99,6 pour cent du poids total des matières, malgré les difficultés provenant de la nature spéciale de quelques alliages et des faibles quantités disponibles pour les essais, constituent donc les premières analyses complètes qui aient été faites des échantillons de FARADAY.

C'est seulement par ces procédés, complétés par des essais métallographiques, physiques, mécaniques et autres, que j'ai pu arriver à me faire une idée exacte de la nature et de la valeur des travaux de FARADAY. Aucun autre moyen n'y pouvait conduire.

Parmi les 20 éléments et matériaux ferreux spéciaux mentionnés par FARADAY à propos de ses recherches, il y a 13 éléments métalliques, dont 7 métaux nobles, 3 éléments non métalliques et 4 composés spéciaux, nommément de l'acier indien, du carbure de fer, un alliage d'aluminium ou acier damasquiné et du fer météorique.

Comme éléments d'addition, j'ai trouvé les suivants dans les échantillons d'acier de FARADAY que j'ai examinés : carbone, chrome, cuivre, or, fer, platine, rhodium, silicium, argent et soufre.

Les éléments iridium, palladium, osmium et étain, n'ont été rencontrés dans aucun des 79 échantillons; il est vrai que ceux-ci ne constituent qu'une faible partie du nombre total de ceux que FARADAY a fabriqués.

Dans une de ses communications, il note qu'il a fait, sans succès, plusieurs tentatives pour allier le titane à l'acier.

Il est assez curieux qu'aucun des alliages fabriqués par FARADAY ne contienne plus de 0,04 à 0,07 pour cent de manganèse et il est évident que ce métal n'avait jamais été introduit volontairement.

Dans les communications de STODART et de FARADAY, il est fait allusion à divers alliages d'acier contenant une très forte proportion d'éléments non ferreux. Les dernières expériences de FARADAY sur les alliages d'acier, inscrites de sa propre main sur son journal, de novembre 1823 à juin 1824, c'est-à-dire jusqu'au 9e mois qui suivit la mort de STODART, se rapportaient précisément à cette catégorie d'alliages.

Ainsi, l'échantillon 7 était de l'acier à 50 pour cent de platine ; l'échantillon 8, de l'acier à 80 pour cent de platine ; l'échantillon 9, de l'acier à 50 pour cent de rhodium.

Malheureusement, on n'a pu retrouver aucune trace ni de ces matériaux, ni d'autres échantillons intéressants mentionnés par Faraday et qui comprenaient du platine et de l'acier corroyé, de l'acier tordu et forgé pour imiter le damasquiné, du fer pur fondu, du fer à 3 pour cent de rhodium et du fer à 3 pour cent de nickel.

L'alliage binaire à plus haute teneur d'acier trouvé dans la fameuse boîte de bois, contient 2,79 pour cent de cuivre; un autre échantillon contient 1,50 pour cent de cuivre et un troisième 2,36 pour cent de chrome.

L'analyse chimique et les essais complémentaires faits sur les échantillons de Faraday, ont posé une série de problèmes très intéressants, qui ont permis de dégager des données expérimentales très utiles.

La plus extrême économie s'imposait dans l'emploi des matériaux soumis à l'analyse chimique et dans la préparation des éprouvettes destinées aux essais mécaniques et autres.

Après mûr examen de toutes les conditions en présence, nous avons arrêté une méthode qui a donné, à l'usage, complète satisfaction.

Un premier examen métallographique et spectroscopique donnait souvent une indication précieuse pour l'étude chimique ultérieure.

On peut conclure, de toute cette série d'essais, dont chacun a apporté, au résultat final, une contribution essentielle, que nous sommes arrivés à connaître parfaitement la constitution de ceux des échantillons de Faraday qui nous ont été conservés.

Le compte rendu complet de la recherche étendue poursuivie par l'auteur, comprenant l'étude et les essais des échantillons, a été fait dans une communication intitulée « Recherche sur l'acier et les alliages de Faraday », présentée à la *Royal Society* et publiée dans les « Philosophical Transactions », vol. 230, 1931.

L'auteur exprime ici sa gratitude au Comité de la *Royal Society* pour avoir bien voulu l'autoriser à se référer ici à cette communication. Il a aussi, sur le même sujet, un ouvrage à l'impression.

Depuis que cet article a été écrit, neuf petits échantillons et un rasoir dont Faraday s'est servi, ont été, grâce à l'amabilité de Sir

Henry Lyons, Directeur du Musée Scientifique et avec le consentement de leur propriétaire, M. A. Evelyn Barnard, mis à la disposition de l'auteur pour une étude complète.

Cette collection, quoique de peu d'importance matérielle, est particulièrement intéressante, car elle représente quelques-uns des importants échantillons d'alliages, d'acier à haute teneur de platine et de palladium que Faraday avait mentionnés et que, jusqu'ici, on croyait disparus.

Cette nouvelle étude est actuellement en cours et fera bientôt l'objet d'une communication ultérieure.

Les quantités relativement restreintes de matériaux fabriqués par Faraday et dont nous disposons maintenant, ne peuvent donner la véritable mesure de tout ce qu'il a accompli dans le domaine des manipulations métallurgiques et il est également impossible d'évaluer tout ce que nous aurions pu découvrir aujourd'hui, en étudiant certains des alliages qui nous manquent, en particulier ceux à haute teneur en platine et à haute teneur en rhodium.

Nous en savons maintenant assez, toutefois, pour pouvoir proclamer que Faraday fut un métallurgiste d'une intuition et d'une habileté remarquables.

Par exemple, il a découvert et noté le fait qu'une proportion d'argent de 1/1 500^{e} seulement exerce une influence importante sur les propriétés de l'acier.

Il fabriqua aussi des alliages d'acier que des autorités indépendantes reconnurent être moins sujets à la rouille que l'acier ordinaire.

Sur des échantillons de ses alliages existant aujourd'hui, on a constaté que 0,74 pour cent de platine détermine une amélioration légère, mais sensible, de la résistance à la traction dans l'acier à haute teneur en carbone; que 2,18 pour cent de nickel et 0,75 pour cent d'or relèvent, dans une proportion marquée, le point de flexion et la ténacité, sans parler de beaucoup d'autres faits intéressants.

Il est impossible de dire combien d'autres renseignements auraient pu être tirés d'une étude complète de la totalité de ses échantillons, si nous avions pu en disposer; mais il y a toute raison de croire qu'ils auraient été extrêmement intéressants et peut-être d'une grande valeur.

Une chose est certaine; l'œuvre de Faraday sur l'acier et ses alliages n'a aucunement abouti à un résultat nul.

Si elle avait pu être seulement reprise et complétée par d'autres, partant du point où il l'avait laissée, les progrès de la métallurgie scientifique auraient été grandement accélérés.

Faraday a été, sans aucun doute, le pionnier des recherches sur les alliages spéciaux d'acier et, s'il n'avait pas été aussi en avance sur son temps, au point de vue des connaissances métallurgiques générales et des besoins de l'industrie, son œuvre aurait presque certainement amené des progrès pratiques immédiats

EXPOSÉS ET RECHERCHES

LE RÔLE DES CIRCONSTANCES EXTÉRIEURES

La fondation de la Royal Institution

par Sir William Bragg, O. M., F. R. S.

C'est la collaboration de Faraday à la *Royal Institution* qui lui fournit l'occasion et les moyens de faire les extraordinaires découvertes que nous commémorons en cette réunion du Centenaire.

Pour cela nous devons rendre un hommage mérité aux hommes distingués qui fondèrent l'*Institution* en 1799 ; leur idéal était noble et, à certains égards, leur prévoyance fut admirable. Il est toutefois remarquable que leur but primitif dut être abandonné au bout d'un très petit nombre d'années ; c'est le génie de Davy et de Faraday, génie dont les premiers fondateurs n'avaient qu'une faible compréhension, qui sauva l'Institution de la faillite et en fit un organisme vigoureux et puissant.

Benjamin Thomson, comte Rumford, conçut le premier, de l'*Institution*, l'idée qui devait finir par se réaliser.

La vie de cet homme à la fois étrange et brillant, écrite par G. E. Ellis et publiée à Boston en 1871, par l'*Académie américaine des Arts et des Sciences*, constitue une des bibliographies les plus intéressantes. Il était originaire du Massachusetts. Pendant les premières années qui suivirent 1770, il enseignait dans une école de Rumford, ville appelée depuis Concord et située dans cet Etat.

Doué d'un remarquable amour de l'ordre et de la discipline, il avait les qualités d'un officier d'état major de premier rang.

Son admiration pour les soldats anglais et pour le général Wentworth et surtout le fait que, dans ces temps troublés, il accepta une charge militaire, conférée par le général dans des circonstances particulières, le séparèrent si complètement de ses concitoyens, qu'il fut obligé de quitter l'Amérique.

En Angleterre, il devint l'ami intime de Lord George Germain, et

fut nommé Sous-Secrétaire d'Etat. Son œuvre scientifique remarquable lui valut le titre de « fellow » de la *Royal Institution*.

En 1784, il entra au service de l'Electeur de Bavière, dont il réorganisa l'armée et, en 1790, il débarrassa Münich des bandes de mendiants qui y pullulaient. En 1796, il était commandant en chef des armées bavaroises ; en reconnaissance de ces services, l'Electeur le fit comte du Saint Empire Romain.

Les écrits scientifiques de RUMFORD, qui se succédèrent sans interruption au cours des années suivantes, traitaient principalement des lois de la chaleur et de l'économie de combustibles.

Les nuages de fumée qui couvraient Londres l'épouvantaient ; aussi publia-t-il un « essai sur les foyers de cheminées, suivi de propositions en vue de les perfectionner et d'économiser le combustible ».

D'ailleurs, il mit ces idées en pratique et put, un jour, dire que 500 cheminées, au moins, fumaient sous sa direction. De ce nombre, étaient celles de l'Hôtel de Lord PALMERSTON à Hanover square, des bureaux de la *Chambre d'Agriculture*, de l'Hôtel du duc de DEVONSHIRE, de Sir JOSEPH BANKS, de la marquise de SALISBURY, etc...

Ces efforts prirent parfois, nous dit ELLIS, la forme d'une véritable passion dans « la poursuite de recherches et de découvertes scientifiques qui devaient servir à soulager le peuple et à accroître son bien-être ».

En 1796, il publia un essai contenant la première esquisse d'un projet qu'il devait développer plus complètement dans une brochure de 1799, sous ce titre : « Proposition tendant à fonder par souscription, dans la Métropole de l'Empire Britannique, une Institution publique destinée à vulgariser la science, à faciliter la diffusion des inventions mécaniques et de leurs perfectionnements, à enseigner, dans des conférences scientifiques accompagnées d'expériences, les applications de la science aux besoins courants de la vie ».

Il existait, à cette époque, une « Société pour l'amélioration des conditions de vie et du bien-être des pauvres », dont un des membres les plus actifs, était un certain Sir THOMAS BERNARD ; parmi les autres, nous citerons le comte de WINCHILSEA et M. WILBERFORCE.

BERNARD, comme RUMFORD, avait des attaches avec le Massachusetts, car son père avait été le dernier gouverneur civil de cet Etat et lui-même avait pris ses grades à l'*Université d'Harward*.

C'était aussi un homme très remarquable ; il avait fait fortune au barreau et avait épousé une femme riche, en sorte qu'il put, de très

bonne heure, se retirer et établir soigneusement un programme d'occupations pour les années qui lui restaient à vivre.

« Lorsque je jugeai avoir acquis, dans ma profession, assez d'argent pour satisfaire mes besoins, je me décidai à quitter le barreau et à chercher quelle occupation utile je pourrais trouver qui ne fut pas propre à accroître pour moi *l'embarras des richesses* ». (1)

« Entreprendre d'améliorer les conditions de la vie de famille dans les classes laborieuses fut le premier divertissement qui s'offrit à moi ; j'adoptai les programmes du comte Rumford pour la nourriture et le chauffage, comme constituant le meilleur début dans mon nouvel emploi. Comme il n'est pas impossible que d'autres que moi désirent un jour pratiquer cette nouvelle espèce de système antipécuniaire, j'exposerai quelques-uns de ses avantages et de ses inconvénients » :

« En premier lieu, pour ceux qui éprouvent le besoin de s'approprier les choses, d'avoir plus de chats, plus de chiens, plus de singes, plus de chevaux de courses, plus de maisons, plus de fermes, plus de maîtresses, plus d'affaires spéculatives en vue d'occuper leurs loisirs et d'absorber leurs soins, la philantrophie offre, ce qui est inestimable, un moyen plus économique, un progrès plus certain, un résultat plus satisfaisant que ce que l'on peut attendre de tout ce que je viens d'énumérer ».

« On peut y rencontrer quelques désappointements, mais courants et vite oubliés. »

« Ce système est celui de la table de jeu, sans ses horreurs. On y apporte le même degré d'ardeur mais on n'en a pas les inconvénients. Bien qu'étant, en général, heureux au jeu, j'ai parfois perdu ma mise. Cependant, mes efforts m'ont presque toujours rapporté des acquisitions d'une valeur satisfaisante ».

La citation précédente est tirée d'un compte rendu de ses faits et gestes écrits par lui en 1818 et qui ne fut publié qu'en 1930, dans « Plaisir et souffrance » de John Murray. Il appliqua son programme avec une ténacité et un succès extraordinaires. Grâce à ses efforts et à l'aide de ses collègues de la sus-dite Société, il parvint à réformer les abus les plus sérieux des institutions charitables de Londres et du Royaume-Uni, à fonder plus d'une œuvre qui existe encore et à mener le bon combat contre la maladie et la misère.

Il institua un club consacré entièrement à la littérature et où l'on interdisait les boissons, le jeu et la politique.

---

(1) Les mots en italiques sont en français dans le texte.

La publication récente de son petit livre montre qu'il méritait d'être honoré et que seule, l'ignorance de ce qu'il a accompli l'a privé de l'être.

Premières dispositions prises

Bernard entra en relations avec Rumford à propos d'une tentative d'amélioration du chauffage et de la cuisine de l'hôpital des Enfants trouvés, dont le premier était trésorier.

Tout naturellement, Rumford entra en correspondance avec lui et en 1799, il finit par lui demander de proposer à sa Société la création d'une Institution établie sur les grandes lignes de son manifeste de 1799.

Bernard soumit la question à son Comité, qui chargea un certain nombre de ses membres de conférer avec Rumford et enfin, dans une réunion tenue au domicile de Sir Joseph Banks, à Soho Square, les premières dispositions furent prises pour fonder l'institution qui devait devenir la *Royal Institution* de Grande-Bretagne.

Comme l'écrit Faraday, dans une lettre adressée à Weld, « les fondateurs n'avaient aucune notion des recherches qui devaient se développer à l'époque de Young et de Davy ». Le projet qu'ils établirent, était, en fait, celui d'un Musée Scientifique moderne et il serait vraiment difficile de prévoir aujourd'hui avec plus d'ampleur et de précision que ne l'a fait Rumford dans l'essai qu'il écrivit à ce sujet, la fonction et l'organisation d'un musée de ce genre.

Il ne subsiste guère, du projet primitif, que le nom de Chambre des modèles, porté encore par l'une des salles de la *Royal Institution*. Mais l'idée devançait son temps : la collaboration des mécaniciens et des savants avec les chefs d'industries resta entièrement stérile.

Dans le court laps de temps d'une année ou deux, la faillite devint inévitable, mais l'habileté de Thomas Young et surtout le génie scientifique de Davy, appuyés par leur situation sociale, renversa complètement la pente que l'on descendait.

Chez Davy, l'ardente poursuite de recherches originales s'unissait à une grande perfection dans l'exposé de leurs résultats. Le public s'écrasait pour l'entendre parler de ses découvertes. Finalement, l'engagement de Faraday, le relieur à la journée, sauva l'institution et inaugura le régime qui a fait l'admiration du monde scientifique.

Bernard excuse d'amusante façon le changement accompli : « Quoique les fondateurs de cet établissement n'aient pas gardé distincte-

ment et exclusivement devant les yeux leur but primitif, qui était de procurer aux pauvres, avec le confort domestique, des occupations lucratives, la classe laborieuse retirera toutefois des avantages aussi importants peut-être des études plus utiles et plus rationnelles qui, grâce à la popularité de cet établissement scientifique, se sont imposées aux classes supérieures de la Métropole. Le bien-être et la moralité des pauvres dépend, autant que de toute autre cause, de la nature des travaux et des occupations des riches ».

Il n'avait évidemment aucune idée de ce que l'institution pouvait devenir et devint en effet.

Quand, au bout de peu d'années, DAVY abandonna le manteau directorial, celui-ci passa, avec une autorité accrue, à son successeur, FARADAY.

Faraday à l'œuvre

C'est au laboratoire de la *Royal Institution*, que FARADAY trouva les moyens de manifester son génie.

Comparés à nos réalisations modernes, ce laboratoire de l'institution était vraiment pauvre mais, pour l'époque, il était remarquable.

FARADAY put se procurer, d'une manière ou de l'autre, les meilleurs appareils connus de son temps.

Ces salles, tranquilles et suffisamment vastes, lui permirent de combiner et d'exécuter ses expériences.

Bien que la réunion d'un grand talent et de facilités matérielles exceptionnelles, permette naturellement d'attendre un bon rendement, le fait que FARADAY ait pu accomplir tant de choses est pour nous un sujet perpétuel d'admiration.

Les fruits de ses recherches semblaient tomber d'eux-mêmes entre ses mains. Mais pourquoi sa part dans la moisson a-t-elle été si grande ? La récolte, sans nul doute, n'était pas aussi aisée à faire qu'elle le paraît. Il avait une vision aiguë de ses buts lointains et il était assuré de l'existence d'une voie qui devait l'y mener.

Il apercevait la direction générale dans laquelle il devait avancer et sa vigilance, bien vite enthousiaste, lui permettait de profiter de toute indication, quelque insignifiante qu'elle fût, lui prouvant qu'il était sur le bon chemin.

Il appliqua ainsi, à nombre de recherches importantes, son génie et son habileté extraordinaires, mais jamais peut-être au même

degré que quand il entreprit, le 29 août 1831, celle qui, en quelques années de merveilleux travaux, posa les fondements de la théorie et de la pratique de l'électromagnétisme.

Un compte rendu de la collaboration apportée par FARADAY à la *Royal Institution* ne serait pas complet si on n'y relevait la facilité remarquable d'exposition qui, autant que la valeur intrinsèque de ses recherches, lui assurait un public mondial. Il existe encore quelques survivants qui, ayant entendu ses conférences, témoignent du charme et de la grande simplicité de sa parole. Ses écrits resteront, pour aussi longtemps que l'on s'intéressera à la science et à son histoire, des modèles de lucidité, de sincérité et de force d'esprit.

Ainsi, grâce à la *Royal Institution* il a pu, non seulement accomplir son œuvre, mais aussi la faire connaître au monde.

Le concours de l'Institution et de l'homme se révéla singulièrement satisfaisant et fécond.

LES ORIGINES DE L'ÉLECTROTECHNIQUE

CE QUE L'INDUSTRIE DOIT A LA SCIENCE

L'unité des Phénomènes naturels,

par Sir Ambrose Fleming, F. R. S.

Nombreuses ont été, dans le passé, les inventions et les découvertes qui, à leur apparition, semblaient être bien peu de chose, mais que leurs conséquences ultérieures ont révélées avoir été sensationnelles. L'invention, par James Watt, du condenseur indépendant a transformé la vieille machine de Newcomen en un moteur primaire très économique et a ouvert, dans l'histoire, le règne de la machine à vapeur. De même, aucune des découvertes initiales qui devaient nous procurer, avec le temps, la télégraphie électrique, la photographie, le téléphone, le microphone, la lampe électrique à incandescence, l'accumulateur, le cinématographe, la télégraphie sans fil, la valve thermoionique et le récepteur de télégraphie sans fil, ne parut tout d'abord avoir une grande valeur et quelques-unes d'entre elles furent même raillées comme inutilisables. Néanmoins, toutes ont servi de fondement à de grandes industries qui font vivre maintenant d'innombrables personnes.

Il est une découverte scientifique, remarquable entre toutes par ses conséquences lointaines qui nous mettent à même de mieux tirer parti des grandes énergies de la nature pour le bénéfice de l'humanité. C'est celle de l'induction des courants électriques, accomplie par Faraday dans les laboratoires de la *Royal Institution* de Grande Bretagne, à Londres, le 29 août 1831.

Ce résultat de premier ordre, dont personne n'aurait probablement à l'époque qui l'a vu naître, donné un shilling, lui a permis de trouver, grâce à ses travaux ultérieurs, un nouveau procédé de production des courants électriques par le déplacement relatif d'un aimant et d'une bobine de fil. La découverte, une fois complétée, stimula la pensée de beaucoup d'ingénieux inventeurs et nous apporta, avec le temps, la dynamo, l'alternateur, le transformateur, la bobine d'in-

duction, pierres angulaires sur lesquelles a été élevé l'imposant édifice de l'électrotechnique.

Faraday lui-même ne porta jamais son attention sur les applications dites utilitaires de ses travaux scientifiques ; son esprit se concentrait entièrement sur la pénétration toujours plus profonde des secrets de la nature; sur l'analyse, l'exploration, l'explication des phénomènes de la physique et de la chimie et, en particulier, de ceux groupés sous les noms d'électricité et de magnétisme. Pendant près de 40 ans, il se rendit, chaque jour ouvrable, à son laboratoire pour y interroger la nature par quelque nouvelle expérience et jamais il ne s'arrêta avant d'avoir obtenu, par oui ou par non, une réponse suffisante à sa question.

Le grand monument qu'il a élevé dans le domaine des recherches électriques est constitué par les trois volumes de ses « Experimental researches in electricity » où il relate les travaux fructueux qu'il poursuivit avec ardeur pendant un quart de siècle.

Premières expériences

Faraday fut guidé, dans toute son œuvre, par sa foi profonde en l'unité des phénomènes naturels et, en particulier, par l'idée que les faits observés en un domaine, trouvent leur parallèle dans quelque autre.

En électricité, nous avons affaire, soit à l'électricité au repos, sous forme de charges réparties à la surface des conducteurs, soit à l'électricité en mouvement, appelée courant életrique et traversant leur masse. Il savait que, lorsqu'une charge électrique est au repos sur un conducteur, elle attire, sur les autres conducteurs qui l'entourent, une charge égale, de signe opposé. Ce phénomène était appelé induction électrique et, ultérieurement, Faraday montra l'égalité exacte de ces deux charges, inductrice et induite. Il est, en fait, impossible de créer une charge d'électricité d'un signe quelconque, positif ou négatif, sans créer en même temps une charge égale de signe opposé.

Faraday se posa alors la question de savoir si un effet semblable ne pouvait être reconnu aussi dans le cas des courants électriques et si un courant ne pourrait en induire un autre dans un conducteur adjacent.

En novembre 1825, il tendit parallèlement deux longs fils. Les extrémités de l'un d'eux étaient fixées à un galvanomètre, instrument des-

tiné à révéler le passage d'un courant électrique par son action sur une aiguille aimantée suspendue. L'autre fil était relié à une batterie de piles voltaïques. Mais, aussi bien le 2 décembre 1825 que le 22 avril 1828, il dut noter que l'expérience ne donnait « aucun résultat ».

C'est souvent un rien qui, dans une expérience, sépare l'insuccès de la réussite. Dans le cas présent, il a pu arriver qu'un fil ait été réuni à la batterie avant que l'autre l'ait été au galvanomètre.

En août 1831, Faraday recommença l'attaque et exécuta l'expérience décisive qui devait immortaliser sa mémoire. Il enroula sur un anneau de fer, de 15 cm de diamètre, deux circuits de fils de cuivre recouverts chacun d'un ruban de coton destiné à les isoler. Les extrémités de l'un des fils furent reliées comme auparavant au galvanomètre, celles de l'autre, à la batterie voltaïque. Il reconnut qu'il ne se produisait pas de courant électrique permanent dans le circuit du galvanomètre, mais il remarqua qu'au moment où l'on envoyait le courant de la batterie, l'aiguille du galvanomètre était déviée, soit d'un côté soit de l'autre, indiquant le passage d'un courant temporaire dans le second circuit ; et que lorsque le courant de la batterie cessait, l'aiguille déviait de l'autre côté, indiquant un courant de sens opposé.

Faraday appelait ces courants de courte durée les courants induits « inverse et direct ». Il savait bien que, tant que le courant de la batterie passait, l'anneau de fer était aimanté et ceci le conduisit, le 24 septembre 1831, à tenter une autre expérience ; il plaça une barre de fer droite dans un tube de carton, à l'extérieur duquel il enroula une certaine longueur de fil isolé relié, comme auparavant, au galvanomètre. Il appliqua alors, sur les extrémités de la barre de fer, les pôles opposés de deux barreaux aimantés et il reconnut qu'il se produisait un courant induit au moment où il approchait ou éloignait les aimants.

Le 1er octobre, supprimant complètement le fer, il enroula autour d'un bloc de bois deux fils isolés l'un de l'autre. Il découvrit alors que s'il lançait ou supprimait un courant électrique dans un des circuits qu'il appelle « primaire », il créait au même instant un courant temporaire dans le circuit « secondaire ».

Finalement, le 17 octobre, Faraday imagina une expérience décisive qui lui révéla la vérité tout entière. En enroulant autour d'un tube une longueur de 70 m de fil de cuivre isolé dont il relia les extrémités à son galvanomètre, il découvrit que le simple fait d'enfoncer un barreau d'acier aimanté dans le tube ou de l'en retirer, créait momenta-

nément des courants induits de directions opposées. Il avait dès lors en main la clef du phénomène complet.

Il se rendit compte qu'un barreau d'acier aimanté est entouré comme d'une atmosphère, de ce que nous appelons maintenant le champ magnétique et que ce champ de force est distribué ou disposé en lignes courbes appelées lignes de forces, partant des pôles de l'aimant ou y aboutissant. Il lui apparut clairement que, lorsqu'on enfonce l'aimant dans la bobine de fil, ses lignes de force magnétique coupent transversalement les spires du fil et que c'est cette action qui crée le courant induit.

Partant de là, il imagina une expérience finale et concluante qui lui permit de produire un courant continu ou ininterrompu par le simple déplacement d'un conducteur entre les pôles d'un aimant. Il monta sur un axe, à la manière d'une meule, un disque circulaire de cuivre, et il appliqua deux lames métalliques flexibles, respectivement sur le bord extérieur et sur l'axe du disque ; ces balais, comme nous les appelons, étaient reliés par des fils au galvanomètre et le disque était disposé de manière qu'une portion de sa surface passât entre les pôles d'un aimant en fer à cheval, de manière à être traversée par les lignes de force. Quand il faisait tourner le disque, un courant continu passait dans le galvanomètre.

C'est ainsi que, pour la première fois, Faraday réalisa une machine qu'il appela magnéto-électrique et qui était l'ancêtre de toutes les dynamos actuellement construites.

Faraday fit alors rentrer l'ensemble de ses nouvelles découvertes dans ce principe général et simple : lorsqu'un corps conducteur de l'électricité, par ex. un fil ou une barre de cuivre, est déplacé dans un champ magnétique de manière à en couper les lignes de force, il devient le siège d'une force électro-motrice proportionnelle à la force du champ et à la vitesse à laquelle il le coupe. Nous pouvons nous figurer le conducteur, ou le fil, comme une épée avec laquelle on couperait des fils tendus au travers d'une salle ; ces fils représentent les lignes de force magnétique, l'épée est le conducteur et, quand elle tranche les fils, elle devient le siège d'une action qui fait passer l'électricité dans la lame de la poignée vers la pointe, ou vice versa. Le seul point faible de cette comparaison est que les lignes de force coupées se rétablissent dès que l'épée a passé, tandis que des fils matériels restent tranchés.

Faraday a exécuté tous ces travaux merveilleusement féconds en dix jours environ, non consécutifs, d'expérimentation ; et, le 20 novembre

1831, il présentait ces résultats à la *Royal Society* de Londres dans une communication qui est une des œuvres classiques de la science électrique.

Le charme de ses écrits est qu'on y trouve tous les détails de ses pensées et de ses travaux. Il y parle de ses échecs autant que de ses réussites, en sorte que le lecteur est tenté de croire qu'il lui suffirait d'avoir accès à un laboratoire pour pouvoir y faire aussi des découvertes et pénétrer dans le cercle magique de ceux à qui il a été donné d'élargir les frontières des connaissances humaines.

Immédiatement après que Faraday eut fait connaître ses découvertes, des inventeurs commencèrent à les appliquer. H. Pixii, en 1833, imagina une machine qui engendrait un courant électrique alternatif par la rotation d'un aimant permanent en fer à cheval devant une paire de bobines de fil appelées « armature ». Une année plus tard, il ajouta à sa machine un dispositif appelé « commutateur », qui permettait d'engendrer un courant continu.

En 1833, J. Saxton et, en 1835, E. M. Clarke, firent des machines magnéto-électriques dans lesquelles l'aimant était fixe, tandis que l'armature tournait devant les pôles. En 1849, une machine semblable à aimants multiples fut construite par Nollet et une autre par Holmes ; celle-ci, actionnée par une machine à vapeur, fut utilisée plus tard au phare de Southforeland pour alimenter une lampe électrique à arc. Puis, en 1856, Werner von Siemens inventa l'armature en tambour ; en 1860, Antonio Pacinotti l'armature en anneau, réinventée par Z. Gramme en 1870. En 1850, H. Wilde introduisit l'emploi des électro-aimants destinés à créer le champ. Ces électro-aimants étaient excités par une petite machine magnéto séparée ; mais, en 1867 Wilde, Siemens et Wheatstone découvrirent, indépendamment les uns des autres, que les électro-aimants pouvaient être excités en partie ou en totalité par le courant produit dans l'armature et ils réalisèrent ainsi la machine auto-excitatrice à laquelle le nom de « dynamo » fut dès l'abord donné pour indiquer qu'elle transformait l'énergie mécanique en énergie électrique.

Depuis cette époque, de nombreux perfectionnements, dus à Heffner-Altenech, C. F. Brush, Elihu Thomson, T. A. Edison, Varley, R. E. Crompton, J. Hopkinson et d'autres, conduisirent à la dynamo à courant continu et à auto-excitation actuellement connue. D'autres, comme S. de Ferranti, W. Mordey, Westinghouse et Ganz nous donnèrent l'alternateur moderne produisant du courant alternatif ; puis

N. Tesla et E. Dobrovolsky inventèrent les alternateurs à deux et à trois phases tels qu'on les emploie actuellement.

Il nous faut voir maintenant comment l'anneau de fer de Faraday, entouré de deux bobines de fil isolé a pris, peu à peu, la forme de la bobine d'induction et du transformateur d'aujourd'hui.

Partant de l'expérience de Faraday exécutée avec deux circuits de fil de cuivre isolé enroulés sur une tige de fer, Callan, Sturgeon, Clarke, Bachhoffner et Henley réalisèrent des bobines d'induction à double enroulement avec noyau, d'abord en fer massif, puis plus tard en un faisceau de fils de fer.

Ruhmkorff, suivant l'exemple de Callan, fit de grosses bobines d'induction dans lesquelles le circuit secondaire était une très longue bobine de fil fin. Lorsqu'on interrompait brusquement le courant primaire, le circuit secondaire devenait le siège d'une force électromotrice assez considérable pour que de longues étincelles jaillissent entre les extrémités de ce secondaire.

Ritchie et Apps firent plus tard des bobines d'induction très puissantes, donnant des étincelles de plus d'un mètre de long. L'application de ces bobines à étincelles s'imposa au début de la télégraphie sans fil.

A la bobine d'induction succéda le transformateur, avec cette principale différence que le noyau de fer de celui-ci constituait un anneau fermé et que le courant primaire produit par des alternateurs remplaçait le courant continu interrompu.

Jablokohff, Gaulard et Gibbs, Zipernowsky, Ferranti, Mordey et beaucoup d'autres, commencèrent à faire des transformateurs à noyau de fer feuilleté.

L'anneau de fer de Faraday fut donc l'ancêtre du transformateur moderne ; mais cette application n'entraînerait qu'une faible transmission d'énergie par des moyens électriques, tandis que toutes les génératrices de courant continu, autrement dit les dynamos, sont réellement sorties de la première machine magnéto-électrique de Faraday, avec son disque de cuivre tournant entre les pôles d'un aimant.

Il est difficile d'évaluer ce que ces splendides découvertes de Faraday ont représenté pour le monde. S'il n'existait ni dynamos, ni alternateurs, ni transformateurs, il n'y aurait ni éclairage électrique, ni transport d'énergie à grande distance, ni traction électrique, ni rien de ce qui constitue la part la plus importante des grandes industries basées sur l'électro-chimie.

L'ensemble des installations de production d'électricité dans le monde, par dynamos ou par alternateurs, représentait croit-on, en 1929, une puissance totale de 99 200 000 kW. La production annuelle de ces installations est évaluée, pour la même année, à environ 282 milliards d'unités du Board of Trade. Si le prix par unité est évalué à 50 centimes français seulement, cette production représente plus de 100 milliards de francs.

LES STATIONS CENTRALES MODERNES

LA TRANSFORMATION DE L'ÉNERGIE

L'Aube d'une ère nouvelle

par W. W. Lackie

Michel Faraday découvrit que, si l'on approche un aimant d'une bobine de fil, celle-ci est parcourue par un courant électrique qui cesse avec le mouvement de l'aimant.

Toutes les génératrices d'électricité sont construites sur ce principe et, dans une centrale moderne, d'énormes aimants tournent en s'approchant ou s'éloignant sans cesse d'une bobine de fil.

Lorsqu'il fit sa grande découverte, Faraday ne disposait d'aucun moyen d'évaluer, ni l'énergie nécessaire pour faire tourner les aimants, ni la quantité d'électricité qu'ils engendraient, les instruments de mesure indispensables n'existant pas à cette époque.

Une station centrale d'électricité est une fabrique transformant en énergie électrique l'énergie du charbon ou de tout autre combustible. Lord Kelvin a démontré théoriquement que l'énergie ne peut être créée, mais peut seulement changer de forme.

En d'autres termes, nous ne pouvons forcer la nature à augmenter le montant total d'énergie existant dans l'univers. L'énergie peut être définie comme le pouvoir de produire du travail ; les combustibles, (y compris l'huile et le pétrole), les aliments, le vent, les rayons solaires, les marées, sont des sources d'énergie ; le mouvement, tel que celui d'un volant ou d'un boulet de canon, l'eau accumulée à un niveau surélevé, l'électricité, un ressort de montre enroulé, les radiations, sont des formes de l'énergie.

Pour une station centrale moderne, la source d'énergie est dans le charbon. Imaginer et perfectionner les moyens de transformer en énergie électrique cette énergie du charbon, tel est le domaine propre où l'habileté de l'ingénieur doit légitimement s'exercer.

Malheureusement, il n'est pas possible d'obtenir de transformation directe, il est nécessaire de passer par une série de transformations in-

termédiaires. de rendement plus ou moins élevé. Le charbon brûle dans un foyer ; sa chaleur produit, dans une chaudière, de la vapeur à haute pression ; cette vapeur est amenée à une turbine, où son énergie se transforme en énergie mécanique ; l'énergie mécanique de la turbine entraîne la génératrice qui débite de l'énergie électrique. Le rendement d'une station centrale est donc le rapport entre le nombre d'unités calorifiques équivalant à l'énergie électrique débitée et le nombre d'unités calorifiques contenues dans le charbon consommé.

Ce rapport est évalué en kilogrammes de charbon par unité engendrée. Aujourd'hui, les meilleures stations centrales consomment 600 g de charbon par unité électrique produite. Si ces 600 g donnent en brûlant 3 780 grandes calories, l'équivalent calorifique d'une unité électrique étant de 859 grandes calories, le rendement d'une station centrale moderne ressort à environ 23 pour cent, autrement dit 23 pour cent de la chaleur contenue dans le charbon brûlé sous la chaudière sortent de la station centrale sous forme d'énergie électrique. Il est probable que ce chiffre pourra être augmenté.

Dans quelques stations centrales, le charbon est amené par eau, dans les autres, par chemin de fer. Une benne, main géante, plongeant dans la cale du vapeur ou dans le chaland chargé de charbon, y prend à chaque poignée une ou deux tonnes pour les mettre à quai ; là, le charbon tombe sur un convoyeur qui le porte, soit directement aux trémies au-dessus des chaudières, soit dans un parc à charbon pour être employé plus tard. Lorsque le charbon arrive par rails, le wagon est amené à une plate-forme mobile ; un mécanisme dissimulé l'élève et bascule le charbon sur un convoyeur qui le conduit à l'endroit voulu.

Un à un, les wagons arrivent à la plate-forme mobile, les wagons vides passent sur les voies de garage.

La consommation journalière pouvant être de 2 000 à 3 000 t, les dispositifs de déchargement et d'emmagasinement du charbon fonctionnent sans arrêt au moins 8 heures par jour ouvrable. La nuit et pendant les mois d'hiver, bennes et convoyeurs reprennent le charbon au parc et le déposent sur d'autres convoyeurs qui le transportent aux trémies placées sur les chaudières.

Dans la chambre de chauffe d'une centrale moderne, l'absence de main-d'œuvre est impressionnante. Dans une station de 200 000 kW, il suffit de trois ou quatre hommes pour servir plusieurs vastes chaudières. La chaufferie elle-même a cessé d'être un sombre trou à rin-

gards ; bien éclairée, elle ne montre plus la crasse, conséquence ordinaire d'une grande consommation de charbon. Celui-ci tombe, par gravité, sur des tobogans qui le conduisent des trémies supérieures aux grilles placées sous les chaudières ; ces grilles, en forme de chaînes sans fin, avancent lentement, portant le charbon cru qui passe rapidement à l'incandescence, puis elles déchargent les cendres en arrière de la grille dans une trémie spéciale, d'où elles sont transportées à une trémie extérieure pour être évacuées.

Dans quelques stations centrales cependant, le charbon, au lieu d'être brûlé à l'état où il arrive, est d'abord broyé en poudre extrêmement fine; c'est le procédé dit de pulvérisation; il est ensuite injecté dans la chambre de combustion par des brûleurs d'où il sort en longue flamme. Sur chaque chaudière, des appareils divers indiquent les conditions de la vaporisation et enregistrent la quantité de charbon brûlé par heure.

Dans la salle des turbines, on est frappé par l'absence apparente de machines tournantes; turbines et alternateurs sont enfermés dans des enveloppes métalliques; 4 ou 5 turbines pouvant fournir de 50 000 à 150 000 ch, sont disposées symétriquement le long de la salle. 4 ou 5 hommes surveillent le fonctionnement de ces énormes machines, qui tournent avec un minimum de bruit et de poussière. Des manomètres et des instruments divers indiquent ce qui se passe à l'intérieur ; des appareils de signalisation mécanique et des téléphones mettent constamment les surveillants en rapport avec l'ingénieur qui, de la salle du tableau, placée souvent loin de celle des machines, dirige l'exploitation de la Centrale.

Au-dessous du sol de la salle des turbines, se trouvent d'énormes condenseurs cylindriques. Après avoir travaillé dans la turbine, la vapeur est refroidie et condensée, puis des pompes renvoient aux chaudières l'eau condensée. Pour effectuer cette condensation, des pompes doivent envoyer, dans les tubes de refroidissement traversant les condenseurs, des volumes d'eau considérables. Disposer d'une grande quantité d'eau froide est donc considéré comme une nécessité absolue pour une station centrale moderne; lorsqu'on ne peut s'en procurer dans une rivière ou un canal voisins, il est nécessaire d'établir des tours de réfrigération.

Nous arrivons maintenant à la salle de contrôle. Là aussi, l'absence de bruit est remarquable. Le long de trois des côtés de la chambre sont dressés des panneaux d'ardoise montant jusqu'à 3 m du sol. Il y a un panneau par générateur et un par feeder transportant l'éner-

gie électrique hors de la centrale. Sur chaque panneau, des appareils indiquent l'intensité et la tension du courant : des compteurs enregistrent le nombre de kilowatt-heures fournis par les génératrices ou allant chez les abonnés. Cette salle de contrôle ou de commande constitue le cœur et les poumons de la station centrale. Un diagramme, fixé au-dessus des panneaux, reproduit les connexions établies entre les génératrices et les feeders; des disques de signalisation automatique indiquent si les interrupteurs sont ouverts ou fermés; des lampes rouges, vertes et blanches apprennent à l'opérateur quelles sont les machines ou les feeders en charge et si tel interrupteur est ouvert ou fermé.

Des signalisations mécaniques et des téléphones permettent à l'ingénieur du contrôle de tenir constamment le surveillant de la chambre de chauffe et les agents de la salle des machines au courant de la charge et de leur donner l'ordre de faire fonctionner ou d'arrêter une turbine ou une chaudière suivant les variations de la demande.

Aujourd'hui, les interrupteurs de commande de la distribution sont placés dans un bâtiment séparé, voisin de la salle des machines et sont actionnés par une transmission à distance depuis la salle de contrôle.

Sur le quatrième mur de la salle de contrôle est une carte du secteur alimenté par la Centrale. Des lignes y représentent les feeders rayonnant depuis la Centrale jusqu'aux nombreuses sous-stations. On y voit encore des disques ou de petites lumières indiquant si un feeder est « en charge ou hors charge » et, au cas où un feeder est en réparation, quels sont les autres passages possibles de l'énergie vers l'une quelconque des sous-stations.

Des relevés sont faits continuellement par les agents durant 24 heures par jour et 365 jours par an. Pour chaque période de 8 heures, l'ingénieur du contrôle est à même de connaître et de totaliser les poids de charbon consommé et de vapeur produite, les unités d'énergie électrique engendrées et livrées, le rendement de l'usine exprimé en kilogrammes de charbon par kilowatt-heure livré.

De minuit à 7 heures du matin environ, la production, à peu près constante, correspond à l'énergie consommée pour l'éclairage des rues, par les usines à travail de nuit et par la presse quotidienne. A 7 heures du matin, une grande partie de la consommation de nuit cesse ; elle est remplacée par celles des bureaux, des magasins et des usines à travail de jour. Il en résulte que, pendant les mois d'été, la production de la Centrale atteint graduellement le triple de la

production de nuit, puis se maintient à peu près constante jusqu'à 19 h avec une réduction de courte durée, au moment du repas de midi. Pendant les mois d'hiver, la consommation est à peu près quatre fois celle d'été, avec une pointe de charge marquée entre 15 et 18 heures.

Une station moderne, avec son réseau rayonnant de câbles, permet de fournir sur un territoire étendu l'énergie demandée pour tous usages. Il n'est plus nécessaire qu'un industriel consommateur d'énergie établisse son usine dans un district surpeuplé. Il prend l'énergie dont il a besoin à la grande centrale la plus proche et il ne vicie plus l'atmosphère.

Il n'est plus besoin d'élever des forêts de cheminées ; les travailleurs peuvent habiter et vivre dans l'air pur et dans la propreté, qui passaient jusqu'ici pour un apanage des régions non industrialisées. Les petites industries et les petits ateliers ruraux sont aussi des consommateurs d'énergie et nous sommes amenés à constater que la Centrale moderne constitue la première condition pour l'établissement des ateliers loin des districts congestionnés de nos villes. L'électricité s'applique également bien aux besoins des grands et des petits consommateurs. Une même source d'énergie pourra, au même moment, alimenter des laminoirs absorbant plusieurs milliers de chevaux et le moteur, d'un dixième de cheval, qu'emploie le dentiste.

La fourniture de courant par une station centrale présente beaucoup d'avantages. L'électricité peut être en effet facilement transformée avec le maximum de rendement en presque toute autre forme d'énergie.

La première application de l'électricité et qui nous est encore la plus familière, a été l'éclairage. Elle a révolutionné celui des rues. Dans les théâtres, tous les effets de scène, aujourd'hui si merveilleusement réalisés, ont été rendus possibles par son emploi. L'intensité de l'éclairement dans les magasins, les boutiques, les restaurants n'est pas comparable à ce qu'elle était avant l'électricité. Celle-ci a fait faire un pas énorme au confort et à la tenue de nos intérieurs. Les maîtresses de maison n'apprécient pas seulement la propreté de la lumière électrique, elles font encore appel à l'électricité pour le repassage, la cuisine, les nettoyages, le lavage du linge, le chauffage de l'eau courante, tout en s'affranchissant de la saleté et de l'ennui causés par la manipulation du charbon, l'enlèvement des cendres, le ramonage des cheminées. L'agriculteur commence à se rendre compte des possibilités que lui offre l'électricité.

Sur les lignes de chemin de fer électrifiées, les voyageurs apprécient la propreté et la douceur du roulement, et les trains supplémentaires que permet toujours l'électrification. Les stations centrales modernes sont à même de satisfaire à toutes les demandes que pourront leur faire, une fois les grandes lignes électrifiées, les compagnies de chemin de fer et celles-ci s'éviteront ainsi la dépense et la peine de bâtir et d'exploiter des stations centrales pour leur usage exclusif.

Un des avantages de la station centrale appelée à fournir des charges diverses aux différentes heures du jour, est que chaque unité génératrice de la station fait le travail d'un nombre au moins triple d'unités qu'il aurait fallu installer si chaque consommateur avait eu sa propre usine électrique, ce qui se traduit par une économie de capital et une réduction correspondante du prix de la fourniture.

De plus, dans la Centrale moderne, le charbon est brûlé dans les meilleures conditions économiques sous la surveillance d'ingénieurs spécialisés dans les questions de chauffe ; il en résulte que l'on consomme par kilowattheure moitié moins de charbon que si chaque consommateur avait son usine ; le charbon peut être brûlé et les gaz de combustion traités de manière à supprimer toute émission de fumée ou de gaz délétères. On a estimé que l'on brûle, sous les chaudières individuelles, deux fois autant de charbon et sur les grilles domestiques, six fois autant qu'il n'est nécessaire pour le résultat cherché.

On brûle annuellement 40 millions de tonnes dans les foyers domestiques d'Angleterre ; les produits de la combustion se déversent dans l'atmosphère qu'ils souillent au détriment de la santé publique, de la vie des plantes, d'une foule de marchandises, pour ne rien dire du gaspillage résultant de la fourniture de porte en porte de petites quantités de charbon et de l'enlèvement des cendres qui s'en suit, toutes choses que l'emploi de l'électricité peut faire disparaître.

La Centrale Electrique moderne nous ouvre l'ère de l'électricité ; nos travaux étant désormais accomplis par cet agent propre et mobile, nous verrons disparaître la malpropreté, l'air pur et la lumière du soleil seront rendus à nos villes, au plus grand profit de notre santé, de nos loisirs et de notre confort.

LA CONSTANTE DIÉLECTRIQUE

EXPÉRIENCES SUR LES CONDENSATEURS

Les molécules et leurs charges,

par le Professeur P. Debye

En 1837, alors que Faraday commençait à méditer sur les forces électriques et sur la manière dont elles se transmettent d'un point à l'autre de l'espace, la plupart des physiciens contemporains, s'ils avaient connu ses préoccupations, les auraient considérées comme un bien futile début. La loi de Coulomb était solidement établie ; pour pouvoir en calculer les forces, il suffisait de connaître les charges et leur distance, exactement comme pour les planètes soumises à la gravitation.

Cette conviction était générale et personne ne soupçonnait que le milieu séparant les charges pût jouer un rôle quelconque, sauf celui d'isolant empêchant les charges de se dissiper.

Mais l'action à distance faisait horreur à Faraday ; aimant à se faire une claire vision des choses, il imaginait l'action électrique comme une propagation progressive d'une charge à l'autre.

Il est bien certain que si le mode de propagation est tel, il devra dépendre de la substance qui lui servira de véhicule ; en se plaçant à ce point de vue, Faraday fut tout naturellement conduit à faire des expériences sur l'influence possible de l'isolant dans la distribution du champ électrique.

Il disposait de deux condensateurs sphériques aussi identiques que possible, constitués chacun de deux sphères concentriques séparées d'environ 12 mm. Il se convainquit d'abord que, s'il chargeait seulement la sphère intérieure de l'un des condensateurs et mettait ensuite la sphère intérieure du second en contact avec la première, il enlevait à celle-ci exactement la moitié de sa charge totale. Mais il introduisit ensuite entre les sphères d'un des condensateurs, un isolant, du soufre par exemple et, répétant l'expérience avec ce nouveau dispositif, il fut conduit à sa découverte. La charge ne se partageait

plus en deux parties égales, mais le condensateur contenant la matière isolante en prenait toujours la plus grande part. FARADAY mesurait ces charges avec la balance de torsion de COULOMB. Cette expérience était donc quantitative et il put caractériser, de suite, l'influence de l'isolant par une constante spécifique qu'il appela la « capacité inductive spécifique », et qui, maintenant, est toujours désignée sous le nom de « constante diélectrique ».

Nous savons aujourd'hui que CAVENDISH avait découvert, longtemps auparavant, la capacité inductive spécifique, mais ses notes n'avaient pas été publiées du temps de FARADAY.

FARADAY chercha alors à se représenter la manière dont on peut se figurer l'effet inductif d'un isolant. Les substances qu'il employait étant isolantes, aucune charge ne pouvait y passer d'une molécule à l'autre mais, dans l'intérieur de chaque molécule, un déplacement de charge est possible.

S'il en est ainsi, sous l'influence du champ électrique, toute molécule se polarisera, prenant une charge positive à une de ses extrémités, une charge négative à l'autre et toutes les molécules s'orienteront, avec leur charge positive dirigée vers la plaque du condensateur chargée négativement.

Telle est la théorie de FARADAY qui met en évidence la façon dont l'isolant réagit sur les plaques du condensateur, pour attirer à leur surface une charge supplémentaire. « Un isolant, dit-il, se comporte de la même façon qu'un grain de matière que l'on introduirait entre les plaques du condensateur et qui resterait isolé des grains environnants ».

Par là nous sommes amenés, en partant de la constante diélectrique macroscopique, à considérer la molécule et ses propriétés. La mobilité des charges ne serait-elle pas très différente dans des molécules différentes et cette mobilité ne serait-elle pas liée à leur structure chimique ?

FARADAY pose la question et, comme toujours, il essaie d'obtenir la réponse par de nouvelles expériences.

Il remplit successivement l'espace séparant les deux sphères de l'un de ses condensateurs avec des gaz de propriétés chimiques très différentes. Il s'efforce à plusieurs reprises de déceler des différences avec la charge prise par la sphère intérieure du second condensateur quand il est rempli d'air. Mais ici il échoue. Sa méthode n'est pas assez sensible.

Il se pose une seconde question. La température n'a-t-elle pas d'in-

fluence sur la polarisation ? Il essaie l'air chaud et l'air froid ; il échoue encore.

Il se pose une troisième question : la polarisation d'une molécule ne varie-t-elle pas suivant la direction ? Il prend des cristaux dont les molécules ont une orientation fixe et il cherche à relever des différences de capacité spécifique inductive suivant diverses directions. Il note que dans une expérience il s'est manifesté une différence mais que, dans les autres, aucun effet n'a pu être décelé.

Toutes ces expériences, bien qu'elles n'aient pas donné de résultats positifs, illustrent magnifiquement les dons prophétiques de FARADAY. C'est, en effet, précisément cette sorte de questions qui a joué un rôle prédominant dans le développement ultérieur du sujet. Il est vrai que la mobilité des charges dans une molécule est beaucoup plus petite que l'image du grain chargé ne semble le suggérer. De plus, nous savons maintenant que les molécules sont, pour la plupart, en permanence, positives d'un côté et négatives de l'autre et peuvent, par suite, créer un effet d'induction par leur orientation seule, comme de petites aiguilles aimantées. Le point important est toutefois que FARADAY ait eu très distinctement l'intuition que la capacité inductive spécifique devait être intimement liée à la structure atomique de la molécule.

C'est de ce pressentiment que tout le travail effectué jusqu'à l'heure actuelle sur les constantes diélectriques, a apporté une glorieuse justification.

LE DÉVELOPPEMENT DES COMMUNICATIONS SANS FIL

AUGMENTATION PROGRESSIVE DE LA PORTÉE

Accroissement rapide de la radiodiffusion

par le Marquis MARCONI

La télégraphie sans fil peut faire, à bon droit, remonter son origine jusqu'à l'époque de MICHEL FARADAY, car ce fut sa découverte de 1830, montrant qu'il n'était pas nécessaire que deux circuits électriques fussent en contact physique direct pour que l'énergie électrique passât de l'un à l'autre, qui appela l'attention sur le milieu séparant ces deux circuits électriques, milieu dont le rôle est si grand dans les communications sans fil.

Son importance fut de nouveau mise en lumière quand, en 1837, FARADAY montra, pour la première fois, que la charge communiquée à un condensateur est localisée, non sur les plaques conductrices, mais dans le milieu isolant qui les sépare.

Il chercha alors à expliquer cet effet, qui se manifeste dans une matière solide comme le verre, ou gazeuse comme l'air, par la conception d'un champ électrostatique constitué de tubes de force. L'étude théorique de CLERK MAXWELL, sur le mouvement de ces tubes de force dans l'éther, milieu hypothétique de texture extrêmement fine emplissant tout l'espace comme aussi les intervalles entre les molécules d'air, aboutit à sa magistrale « Théorie de l'électromagnétisme » qu'il publia en 1865 ; il démontra l'existence indépendante, dans l'espace, de boucles fermées ou tubes de force constituant les composantes élémentaires des ondes de télégraphie sans fil.

HEINRICH HERTZ démontra, en 1888, l'existence de ces ondes libres qu'il produisait par la décharge en étincelles d'un condensateur électrique ; parmi les procédés employés principalement à bord des navires, ce dernier a survécu jusqu'à maintenant, avec de grands perfectionnements d'ailleurs, portant, soit sur les circuits électriques, soit sur la méthode opératoire.

Hertz, au moyen de réflecteurs paraboliques en métal, concentrait les ondes sur un trajet donné entre le transmetteur et le récepteur ; les longueurs d'ondes employées variaient de 70 cm à 6 m.

Quand je commençai mes recherches à Bologne, dans l'intention expresse d'utiliser les ondes électromagnétiques pour télégraphier à travers l'espace et de nouveau en 1895, quand je présentai les premiers appareils pratiques d'exploitation, j'employai de semblables réflecteurs combinés avec un oscillateur à étincelles établi par le Professeur Righi ; ceci me permit d'utiliser une longueur d'ondes encore plus courte, d'environ 10 cm, avec un récepteur à cohéreur et un appareil Morse enregistrant les signaux transmis.

Ce fut avec ces très courtes longueurs d'ondes que je fis ma première démonstration devant le *British Post Office*, en 1896.

La conquête de l'espace

Au cours de mes premières expériences, je parvins à augmenter considérablement la portée des transmissions ou, en d'autres termes, à télégraphier à des distances qui étaient alors considérées comme « grandes » en m'écartant notablement des procédés employés jusqu'alors par Hertz et ses successeurs; la modification consistait à relier chacun des appareils, transmetteur et récepteur, d'une part à un conducteur aérien, d'autre part à la terre.

Je pus ainsi découvrir que la limite de portée des communications croissait très rapidement avec la hauteur au-dessus du sol des conducteurs aériens, ou antennes, en sorte qu'au bout d'un temps relativement court, la télégraphie devint possible sur des distances de 50 km.

Les essais de réflecteurs firent dès lors place à des recherches et à des perfectionnements dans l'emploi des antennes, ce procédé laissant espérer des résultats plus immédiats et les longueurs d'onde employées furent en conséquence portées à 150 m et plus.

L'œuvre de Sir Oliver Lodge et mon brevet d'accord de 1 900, qui appliquait aux circuits oscillants le principe si important de la résonance, marquent une nouvelle étape franchie en télégraphie sans fil ; dès lors, grâce à l'accroissement progressif de la puissance des appareils, de la hauteur des antennes et des longueurs d'onde utilisées, commença la conquête de l'espace, qui aboutit à l'établissement des réseaux actuels d'intercommunications mondiales.

Dans le présent article, je ne puis rappeler que quelques-uns des

événements et progrès les plus notables qui se sont succédé depuis cette époque.

En décembre 1901, au moyen de stations spécialement établies, je pus, pour la première fois, transmettre et recevoir des signaux télégraphiques à travers l'Océan Atlantique, entre Poldhu, en Cornouaille, et Saint John de Terre-Neuve, sur une distance de près de 3 000 km.

Ce résultat, qui constituait par lui-même une découverte, me confirma dans l'opinion que les ondes électriques ne sont pas arrêtées par la courbure de la terre et peuvent, par suite, se propager à une distance quelconque à la surface de notre planète ; j'avais eu déjà cette idée plusieurs années auparavant et elle avait soulevé une très forte opposition. A ce propos, c'est cependant un plaisir pour moi de rappeler l'aide que j'ai rencontrée auprès du journal « *Le Times* », qui m'a toujours assuré, pendant la longue période de discussions qui suivit mes premiers essais transatlantiques, un appui et des encouragements inlassables.

Cette découverte donna une telle impulsion au développement des communications sans fil, qu'un nombre relativement court d'années après la réception de la lettre S par télégraphie sans fil à travers l'Atlantique, tous les pays importants du monde furent munis d'une installation.

La communication avec l'Australie fut réalisée en 1918, quand les premiers messages furent transmis de ma station de Carnarvon, à Sydney, en Nouvelles Galles du Sud, par W. M. Hughes et Sir Joseph Cook. Au début de 1902, au cours d'une traversée sur le paquebot américain « Philadelphie », je reconnus que je pouvais recevoir des messages jusqu'à une distance de 1 200 km le jour et de 3 000 km la nuit.

J'avais découvert ainsi le phénomène, maintenant bien connu, que les signaux de télégraphie sans fil, transmis par ondes de quelques centaines de mètres de longueur peuvent, d'ordinaire, être reçus pendant la nuit à des distances beaucoup plus grandes que pendant le jour.

Dans ces essais, la puissance totale employée pour la transmission était de 12 kW, la longueur d'onde de 40 m et la hauteur d'antenne, de 66 m.

Au cours des années suivantes, le progrès dans les transmissions à longue distance se traduisit par une constante augmentation de la puissance et des longueurs d'onde; enfin, en 1923, le point culmi-

nant de l'ère des ondes longues fut atteint par le *Post Office Britannique*, quand il commença l'installation de la station à ondes longues et à grande puissance de Rugby.

La Compagnie MARCONI, en accord avec les gouvernements des Dominions, mit en mains, pour communiquer avec Rugby, des stations d'importance analogue en Australie, en Afrique du Sud et aux Indes ; chacune de ces stations était munie de pylônes d'acier de 250 m comme supports d'antennes et de transmetteurs d'environ 1 000 kW, travaillant sur des longueurs d'onde de 20 000 à 30 000 m.

Les progrès réalisés avec le système d'antennes à ondes longues avaient été si rapides, relativement si faciles et, pourrais-je dire, si théâtraux, que pour de nombreuses années, ils détournèrent complètement des ondes courtes l'attention des chercheurs, ce qui, je crois, est à regretter.

Néanmoins, l'art de la télégraphie sans fil et sa technique avaient accompli des progrès très rapides.

Je repris, en Italie, au début de 1916, une recherche systématique sur les possibilités d'emploi des ondes courtes en radio-télégraphie et en radio-téléphonie et avec l'aide de M. G. S. FRANKLIN, je poursuivis des essais sur un système directif qui fut postérieurement dénommé Beam. (Système à faisceau).

Dès les premiers essais, l'utilisation d'ondes de 2 m permit d'atteindre une portée de 10 km qui fut ensuite augmentée jusqu'à 30 km.

Au cours de quelques essais de téléphonie sans fil en 1919, M. FRANKLIN atteignit une portée de 120 km à travers la mer d'Irlande, avec 15 m de longueur d'onde ; en 1921, une communication téléphonique par réflecteurs, fut réalisée dans les deux sens entre Hendon et Birmingham, sur une distance de 160 km.

La lampe thermo-ionique à 2 électrodes, inventée en 1904 par Sir AMBROSE FLEMING et la lampe à 3 électrodes, inventée en 1907 par le Docteur LEE DE FOREST, avaient pris un important développement pendant la grande guerre. Vers 1923, le transmetteur à lampe avait complètement remplacé le transmetteur à étincelles pour presque toutes les communications, sauf quelques exceptions en navigation.

L'introduction du procédé de transmission par ondes entretenues un moyen de lampes, supprima aussi la restriction résultant, pour l'emploi des ondes courtes, de la limitation de puissance qu'imposait le procédé par étincelles ; en 1923, 1924, de soigneux essais de transmission exécutés, entre Poldhu et mon yacht « Electra », en diverses

régions de l'Atlantique et de la Méditerranée et ceux effectués entre Poldhu d'une part, l'Amérique du Nord, l'Amérique du Sud et l'Australie de l'autre, me permirent d'établir complètement la possibilité d'employer, pour les communications à longue distance, des ondes inférieures à 90 m, notamment si elles sont dirigées par réflecteurs.

Dans le cours de 1924, je fus amené à découvrir que l'emploi de longueurs d'onde de l'ordre de 32 m permettait la transmission aux plus grandes distances en plein jour. Ces recherches donnèrent des résultats si satisfaisants, qu'au début de 1924, la Compagnie Marconi décida, conformément à mon avis, de ne pas terminer les stations à ondes longues en cours de montage dans les Dominions et de proposer l'établissement de toutes les communications impériales de télégraphie et de téléphonie sans fil, au moyen de systèmes directifs à ondes courtes.

En raison de ces progrès, le Gouvernement anglais conclut, en juillet 1924, une convention avec la Compagnie Marconi pour l'établissement de stations à ondes courtes du Beam system, munies de transmetteurs de 20 kW et devant communiquer avec des stations semblables du Canada, de l'Afrique du Sud, de l'Inde et de l'Australie.

La convention était soumise à la condition qu'il serait fait un essai pendant 7 jours consécutifs de transmission en duplex, comportant 100 mots au moins à la minute, simultanément dans les deux sens, non comprise toute répétition nécessaire à l'exactitude du service et cela pendant 18 heures par jour sur le circuit du Canada, 11 heures par jour sur le circuit de l'Afrique du Sud, 12 heures sur celui de l'Inde et 7 heures sur celui d'Australie.

Ces conditions furent remplies et les stations anglaises furent livrées au *Post Office Britannique*, entre octobre 1926 et juillet 1927 ; les dernières stations d'Empire, Ballan en Australie et Drumondville au Canada, devaient être achevées en juin 1928.

On commença bientôt le service de 24 heures avec des longueurs d'onde comprises toutes dans la bande de 15 à 40 m. L'organisation de la station impériale du Beam System, connue sous le nom d'Empiradio, permit d'établir rapidement un service à trafic intense qui fit une sérieuse concurrence au trafic par câbles.

Ceci conduisit à la constitution, en septembre 1929, de la *Société Anonyme des communications Impériales et Internationales*, qui prit le contrôle de l'Empiradio, des Câbles Impérial et Pacifique,

de la Compagnie Marconi et de la Société des câbles télégraphiques Orientaux ; cette société centralise actuellement la direction des plus importants services commerciaux de télégraphie sans fil d'Angleterre.

Comme M. Ramsay Macdonald le constatait à la Chambre des Communes : « Les Compagnies de câbles connurent de mauvais jours quand la télégraphie sans fil du Beam System put faire l'objet d'une réalisation commerciale ». Le réseau sans fil, qui couvre le monde entier, est partagé entre l'organisation anglaise, la Radio Corporation d'Amérique, le Transradio représentant les intérêts allemands, la Société Radio France et quelques autres groupes importants.

Il est aujourd'hui, à la fois efficace et sans rival.

Tous les réseaux sont reliés entre eux; le service y est maintenu à un haut degré de rendement et de régularité.

Chaque année, le nombre des communications sans fil augmente, en même temps que la difficulté de trouver des longueurs d'onde sur lesquelles les services nouveaux puissent faire passer leurs communications sans interférer avec les services existants.

Du fait que leur propagation n'est pas favorisée par la haute atmosphère, ce qui restreint leur emploi, les ondes électro-magnétiques de 10 m et au-dessous, restent encore disponibles pour un nombre considérable de transmissions. Le Gouvernement italien, qui a récemment ouvert un service entre Rome et la Sardaigne, emploie des appareils établis par mes collaborateurs et travaillant sur onde de 9 m. Lorsque la courbure de la terre ou d'autres obstacles ne s'y opposeront pas, des communications sur longueurs d'ondes encore plus courtes pourront probablement être envisagées. J'ai une grande satisfaction personnelle à constater que, dans mes recherches actuelles sur l'emploi, pour les besoins commerciaux, d'ondes extrêmement courtes, d'un mètre et au-dessous, j'ai repris l'étude de longueurs d'ondes que j'employais lorsque je fis ma première démonstration réussie de télégraphie sans fil, il y a 36 ans.

Dans cette brève revue, l'importance des services entre postes fixes ne doit pas cependant faire oublier l'œuvre très remarquable accomplie dans d'autres domaines par la télégraphie sans fil.

Son emploi systématique dans la Marine Marchande, qui remonte à l'année 1900, où la première installation permanente de télégraphie sans fil fut établie par ma Compagnie sur le vaisseau allemand « Kai-

ser Wilhem Der Grosse », s'étend maintenant à 15 000 navires de la marine mondiale qui sont en communication entre eux et échangent des messages commerciaux ou techniques avec le réseau national de stations côtières des pays maritimes; l'aide précieuse que la télégraphie sans fil apporte à la sécurité en mer est bien marquée par le grand nombre de Radio-Phares, émettant des signaux caractéristiques qui permettent de faire le point aux navires passant à leur portée.

Un des plus récents développements de la télégraphie sans fil est son application à la Navigation Aérienne.

Il y a 11 ans, tout avion anglais volant régulièrement entre Londres et Paris était muni d'un téléphone sans fil; les aérodromes de Croydon Lympne et Pulham étaient équipés en transmetteurs et radiogoniomètres qui leur permettaient d'indiquer aux avions leur position et de recevoir à tout moment les messages que ceux-ci envoyaient en cours de route.

L'utilité d'un tel service, par mauvaise visibilité, ne saurait être surestimée.

Aujourd'hui, tout avion commercial portant des passagers doit, dans le monde entier, être muni d'une installation de télégraphie sans fil et, sur les routes de l'air les plus importantes, des Radio-Phares ont été établis pour permettre aux pilotes de reconnaître un aéroport sans avoir à demander sa position aux stations terrestres.

Je n'ai pas besoin d'ajouter grand'chose au sujet de l'accroissement phénoménal de la Radio-Diffusion, car il est connu de tous.

Le premier concert radio-diffusé eut lieu à Chelmsford en 1920; Mme Nellie Melba chanta devant un microphone du service téléphonique ; la transmission, sur ondes de 2 000 m, fut reçue par les auditeurs dans un rayon de 1 300 km ; un mouvement se déclancha alors qui se répandit rapidement en tous pays.

Un art nouveau et une industrie nouvelle venaient de naître; un nouvel élément permanent s'introduisait désormais dans la vie nationale et internationale.

La conquête de l'espace par l'électricité, qui est due à la découverte, par Faraday, de l'induction électro-magnétique et aux ondes électriques prédites par Maxwell, a mis à la disposition de l'humanité, non seulement un instrument nouveau et puissant de recherches scientifiques, mais aussi un nouvel agent de civilisation et de progrès; celui-ci maintenant, ne connaît plus de frontières, il peut même s'in-

troduire dans l'espace infini où jamais sans doute auparavant, aucune manifestation de l'activité et de la pensée humaines n'avait pu pénétrer.

L'extension de ce que l'on appelle la radio-diffusion, qui constitue le moyen le plus puissant et le plus rapide que le monde ait jamais connu de répandre les informations, les plaisirs et l'instruction, ne peut qu'amener une compréhension plus étroite entre les peuples.

Elle accroît énormément le parti que l'homme peut tirer de sa voix et de son intelligence. Elle lui permet de multiplier lui-même instantanément, une centaine, un millier ou un million de fois l'expression de sa puissance, de son influence ou de son génie.

La téléphonie sans fil transatlantique et Impériale et la transmission des images par télégraphie sans fil constituent les dernières contributions apportées par les recherches des ingénieurs aux facilités de communication mises maintenant à la disposition du monde; et si le travail intense de laboratoire qui porte actuellement sur la télévision, nous donne, et nous espérons que ce sera à une date assez rapprochée, les résultats pour la conquête desquels nous luttons, le public aura, une fois de plus, l'occasion d'assister à la création d'un nouvel art et d'une nouvelle industrie : la Radio Diffusion par l'image.

L'INDUSTRIE BASÉE SUR LA SCIENCE

CHERCHEURS ET CONSTRUCTEURS

Profit tiré des recherches.

par Sir Richard GREGORY, D. Sc.

Le montant des capitaux investis dans les distributions d'éclairage et d'énergie électrique dépasse, pour le monde entier, cinq milliards de livres et, en Grande-Bretagne seule, plus de cinq cent millions de livres.

Toutes les ramifications de la grande industrie électrique qui utilisent ce capital, sont sorties de la découverte de l'électromagnétisme, faite par FARADAY il y a cent ans et constituent l'aboutissement de recherches purement scientifiques auxquelles personne n'attachait alors de valeur pratique.

On peut dire que cette découverte a ouvert une ère nouvelle, celle de l'électricité. Les inventions du XVIII^e siècle et du début du XIX^e, sortaient des ateliers plutôt que des laboratoires scientifiques. On appliquait, à la construction des machines et à l'exploitation, des procédés, des méthodes, surtout empiriques et erronés. Les recherches académiques n'avaient que peu de points de contact avec la pratique industrielle.

La caractéristique de l'ère nouvelle est l'utilisation, par l'industrie, de principes, de propriétés et de produits, dus à des recherches scientifiques, que celles-ci aient été poursuivies en vue de la science pure ou dans un but pratique.

On a coutume de faire une distinction entre la recherche scientifique et la recherche industrielle, alors qu'en réalité elles se complètent l'une l'autre.

La plupart des recherches poursuivies dans les laboratoires universitaires et enregistrées dans les bulletins des sociétés scientifiques, s'inspirent du désir d'explorer le royaume de la nature et d'élargir les frontières de nos connaissances.

Dans le monde de la science, une recherche est jugée d'après sa valeur propre, non d'après l'argent qu'elle peut faire gagner.

Ses résultats peuvent trouver, après coup, des applications, mais qui constituent seulement des accessoires et rarement le but principal du travail.

D'autre part, une recherche industrielle et technique vise, à l'origine, la création d'un produit directement utilisable ou bien elle porte sur quelque problème de fabrication ou de construction dont la solution ouvrira de nouvelles voies au progrès industriel.

Aux yeux de l'inventeur ou de l'industriel, une découverte doit être utilisable; elle ne comporte pas, comme pour le savant, sa fin en elle-même. Ils ne cherchent pas tant à connaître la nature, qu'à la circonvenir; une recherche qu'ils entreprennent a pour objet, soit de préparer artificiellement une substance naturellement rare ou douée de propriétés particulières, soit de réaliser un procédé nouveau ou de perfectionner un procédé ancien, soit de construire une machine qui accroîtra leur pouvoir sur la nature ou un instrument qui leur permettra de se rire des limites de l'espace et du temps.

Faraday poursuivait ses recherches dans le simple but d'acquérir de nouvelles connaissances; cependant ses travaux ont servi de fondement à toute l'industrie électrotechnique.

Toutefois, dans les progrès et le développement de cette industrie, les recherches techniques entreprises avec des buts pratiques définis, ont joué un rôle très important.

Dans l'évolution des machines et des installations électriques, comme dans toute autre branche de l'électricité appliquée, les progrès ont été accomplis grâce au maintien d'étroites relations entre la science créatrice et le génie inventif, par des hommes capables de tirer, des théories scientifiques, des résultats industriels pratiques.

L'importance que les recherches présentent pour l'industrie électrique, celle des progrès notables que des études spéciales y ont fait faire aux machines, aux applications et aux procédés, ne peut être mise en question.

Les plus grands laboratoires de recherches du monde sont contrôlés par des sociétés électriques telles que : la Western Electric, la General Electric, les Compagnies Bell Telephone aux Etats-Unis et la General Electric Company de Wembley, en Angleterre. Dans aucune autre industrie, l'alliance de la pratique et de la théorie n'a été si étroite et aucune autre n'a tiré un plus grand profit de sa coopération avec la science.

C'est au fait que les principales firmes ont reconnu la valeur des recherches et aussi à la capacité technique des hommes placés à leur tête, que sont dues, pour la plus grande part, les conditions florissantes auxquelles cette industrie est parvenue.

Les premières dynamos étaient construites suivant la méthode du coup de pouce; aussi, leur rendement était-il très insuffisant.

Les connaissances acquises par de nombreux chercheurs ont établi les principes scientifiques qui ont permis de construire ces machines suivant des spécifications précises.

A toutes les phases de l'évolution du transformateur et de la dynamo modernes, des problèmes ont été résolus, grâce à des recherches opiniâtres et, bien souvent, les progrès ont été dus à l'application de nouvelles propriétés ou à l'emploi de nouveaux matériaux découverts dans les laboratoires scientifiques.

Un exemple frappant est celui de l'éclairage, qui fut le premier emploi donné au courant électrique.

La première lampe de Swan et d'Edison, à filament de carbone incandescent, a été remplacée par la lampe à filament de tungstène. L'élément tungstène a été obtenu sous forme métallique vers la fin du xviii^e^ siècle. Ce ne fut, toutefois, que près d'un siècle plus tard, qu'il commença à prendre une importance industrielle pour la confection des outils d'acier à coupe rapide ; il en a été employé de grandes quantités pour cet usage.

Des essais avaient été tentés pour faire en tungstène les filaments de lampes à incandescence ; mais les résultats furent peu satisfaisants jusqu'en 1906, lorsque le Dr Coolidge, aux Etats-Unis, parvint à produire ce métal sous une forme assez ductile pour permettre de l'étirer en fils très fins. Une curiosité de laboratoire prit ainsi une grande valeur industrielle.

En raison de son très haut point de fusion et de sa résistance à la volatilisation à très haute température, le tungstène s'est révélé être le corps qui convenait le mieux pour la fabrication des filaments de lampes à incandescence. La consommation mondiale de ces lampes, qui ont un pouvoir éclairant considérablement supérieur pour une même dépense de courant, est d'environ un milliard par an. On a estimé, il y a quelques années, à environ 50 millions de livres, l'économie annuelle qu'a permis de réaliser le remplacement des anciennes lampes à filament de carbone par les lampes au tungstène.

Un nouveau progrès dû aux découvertes scientifiques est l'emploi de

la lampe à atmosphère gazeuse. Le gaz le plus souvent utilisé dans ce but est l'argon, qui fut, en 1895, isolé pour la première fois de l'air atmosphérique par Sir RAYLEIGH et Sir WILLIAM RAMSAY.

Un autre gaz, que les recherches scientifiques firent peu après découvrir dans l'air, est le néon, employé dans les tubes à décharge électrique ; ceux-ci se sont beaucoup répandus pour les enseignes lumineuses rouges et pour le balisage des aérodromes et des routes d'avions.

La lumière du néon est si pénétrante que le phare de Croydon peut être aperçu des aviateurs survolant la France. On cherche maintenant à produire une lumière incandescente blanche par le mélange de différents gaz et par l'emploi d'un verre spécial pour les ampoules ou les tubes. Il semble donc très probable qu'avant longtemps l'éclairage électrique sera fourni par des gaz luminescents, enfermés dans des tubes et qui remplaceront les filaments métalliques incandescents.

La découverte des rayons X, par RONTGEN, fut le résultat fortuit d'une recherche sur la nature de la décharge électrique dans des tubes ou ampoules de verre contenant un gaz extrêmement raréfié.

C'est de recherches scientifiques du même ordre sur la nature de l'électricité que sortit l'invention de la lampe thermo-ionique employée dans les communications sans fil et aussi la découverte de la nature et des propriétés de l'électron, sur lesquelles reposent les propriétés de ces lampes.

Lorsque RÖNTGEN observa, en 1895, que les rayons produits par un tube à vide étaient capables, non seulement d'exciter la fluorescence, mais aussi de traverser des corps divers et d'impressionner une plaque photographique, ni lui ni personne d'autre à cette époque ne prévoyait que, quelques années plus tard, une installation ou un service de Rayons X seraient regardés comme essentiel à l'équipement d'un hôpital.

On utilise aussi les Rayons X en métallurgie et en construction métallique pour découvrir les défauts de la fonte ou des pièces de machines et leur dernière application à des fins pratiques est la détermination de la structure et, par suite, de la solidité des poils, de la laine, de la fibre, employés dans l'industrie textile.

La lampe thermoionique

Les progrès réalisés par la lampe thermoionique, grâce à l'étude des conditions électriques prévalant à l'intérieur d'une ampoule de lampe à incandescence, sont un autre exemple de services pratiques dus à la recherche scientifique.

Dès 1884, Edison découvrit qu'une plaque de métal isolée, scellée dans une lampe électrique à incandescence et entourée par le filament de charbon employé alors, était au même potentiel, c'est-à-dire dans le même état électrique, que l'électrode négative de la lampe.

Aucun courant ne pouvait, par suite, passer entre cette plaque et la borne négative, mais il reconnut qu'un courant passait de la plaque à la borne positive. Quelques années plus tard, Sir Ambrose Fleming communiquait à la *Royal Society*, les résultats d'une longue série de recherches sur cet « effet Edison ».

A cette époque, personne n'eut l'idée que ces recherches pouvaient avoir une valeur pratique quelconque.

Le courant de sens unique constitue cependant un effet de soupape sur lequel est basée la construction de toutes les lampes thermoioniques employées pour les communications sans fil.

Sir Ambrose Fleming lui-même, en 1904, imagina sur ce principe un détecteur d'oscillations à haute fréquence; trois ans plus tard, le Dr Lee de Forest introduisit dans l'ampoule, entre la plaque et le filament, la grille séparée qui transformait le détecteur en relais, ou amplificateur du type employé pour les récepteurs de radio-diffusion et aussi pour la production d'oscillations électriques de haute fréquence dans les stations émettrices.

Chaque année, en Angleterre, il est présenté près de quatre millions de demandes d'installation et d'utilisation de postes de radio-diffusion, apportant à l'Etat un revenu annuel très supérieur à cinq cent mille livres et faisant vivre indirectement une grande industrie née de la recherche scientifique.

Jusqu'à la découverte des lampes thermoioniques, la portée des communications téléphoniques par lignes sous-marines ou souterraines était très limitée.

Sir Thomas Purves, ingénieur en chef au *Post Office*, a fait récemment remarquer que, tandis qu'il y a huit ans, un abonné au téléphone britannique ne pouvait communiquer qu'avec Paris ou Bruxelles, aujourd'hui n'importe qui peut, d'un poste quelconque de Grande-Bretagne, converser avec près de 90 pour cent des stations téléphoniques du monde.

La domestication de l'électron a rendu possible l'emploi de câbles de faible section et, partout où l'on dispose de stations de répéteurs, ces câbles peuvent fonctionner pratiquement à toutes distances sur la terre.

Avant l'introduction des répéteurs à lampes qui permirent d'étendre la portée des communications téléphoniques, on pratiquait la « charge » électrique des câbles.

Les courants de conversations subissent, le long des fils, depuis leur origine, une atténuation et une distorsion. L'étude théorique de ces ondes de transmission, due à Oliver Heaviside, a suggéré des moyens d'éviter la distorsion en répartissant une inductance le long du circuit, soit d'une manière continue, en enveloppant le conducteur d'un ruban ou d'un fil de fer, soit en espaçant convenablement des bobines d'induction appelées « bobines de charge. »

Pour réaliser cette charge, on employa d'abord le fer, mais les recherches de la Western Electric Company, conduisirent à la production d'un nouvel alliage appelé permalloy et constitué d'environ quatre cinquièmes de nickel, contre un cinquième de fer ; il présente, dans certains cas, une grande supériorité pour cet usage.

De nouvelles études amenèrent, pour constituer la charge, à la découverte d'autres alliages magnétiques importants.

L'étude des théories électriques d'Heaviside et l'adoption des câbles télégraphiques sous-marins à charge continue, ont grandement accru la rapidité de signalisation, ainsi que la distance à laquelle les câbles sous-marins peuvent être utilisés pour les communications télégraphiques.

Travaux sur les métaux

Il serait aisé de citer beaucoup d'autres exemples d'applications de la recherche scientifique aux progrès électrotechniques.

Les travaux de Davy et de Faraday à la *Royal Institution* posèrent les fondements de l'électro-chimie, représentée dans l'industrie par le raffinage du cuivre et d'autres métaux, par la fabrication de l'aluminium et par d'autres procédés pratiques.

Moissan inventa son four électrique qui lui permit d'exécuter une série d'expériences de laboratoire et de préparer un grand nombre de métaux à un haut degré de pureté.

Plus d'un million de tonnes d'acier électrique, d'une qualité égale à celles des meilleurs aciers au creuset, sont maintenant fabriquées chaque année au four électrique ; il en est de même d'autres produits industriels importants, le carbure de calcium et le carborundum.

Les avantages financiers et le profit général tirés des recherches scientifiques, en particulier dans le domaine de l'électro-technique, se

montrent donc si évidents qu'il semblerait ne devoir pas être nécessaire de pousser les Compagnies de construction électrique ou de production d'énergie à consacrer une fraction de un pour cent de leurs bénéfices aux travaux de recherches dans des laboratoires, soit universitaires, soit coopératifs.

Même en laissant de côté les recherches purement scientifiques, beaucoup d'autres problèmes techniques attendent leur solution ; nous pouvons attendre avec confiance, de leur étude systématique, de grandes économies et d'importants résultats ; cependant les fonds mis pour des travaux de ce genre à la disposition de la *British Electrical and Allied Industries Research Association* ne constituent qu'une ristourne bien maigre sur les bénéfices déjà acquis ou que l'on peut probablement espérer.

Si la célébration, cette année, du centenaire de FARADAY pouvait amener les industriels et les corporations auxquels profitent les recherches, soit scientifiques, soit industrielles, à mieux comprendre leur valeur et à la reconnaître d'une manière plus généreuse, un résultat d'un grand intérêt national aurait été atteint.

L'INDUSTRIE DE LA CONSTRUCTION ÉLECTRIQUE

UNE GRANDE RICHESSE NATIONALE

Obstacles législatifs du début

par Sir Hugo Hirst

Faraday fit sa grande découverte quelques années après la fin de l'époque napoléonienne et à un moment où la puissance de la vapeur, grâce à ses applications dans l'industrie et dans les chemins de fer, commençait à apporter son aide au pays pour réparer l'épuisement de la guerre. Pendant cette période critique, bien peu de gens se rendaient compte à quel point les inventions de Watt et de Stephenson étaient utiles pour reconstituer les richesses dissipées par une longue série de campagnes et pour en créer de nouvelles, nécessaires à l'existence de notre population toujours croissante, ainsi qu'à l'établissement de l'Empire britannique.

Personne ne pouvait avoir la vision prophétique qu'une simple expérience, faite en ce moment par Faraday, dans son laboratoire, serait l'embryon d'une industrie nouvelle destinée à aider, près d'un siècle plus tard, et dans des conditions analogues, au relèvement national.

C'est cet aspect particulier de notre dette envers Faraday que je me propose d'examiner.

Il a donné une impulsion créatrice aux progrès d'industries et d'entreprises qui se sont révélées comme de toute première importance pour notre développement national.

Quelque importants qu'aient été les fruits pratiques issus de son génie, nous n'en avons pas encore récolté intégralement la moisson. Nous avons devant nous une occasion d'effectuer, grâce à l'électricité, une réforme d'une ampleur et d'une influence supérieures à celles des victoires triomphales que nous avons déjà gagnées.

Il nous reste encore à couronner l'édifice que, grâce à Faraday, nous

avons pu élever. Il est intéressant de suivre comment la série des réalisations reposant sur ses travaux nous a amenés, pas à pas, au seuil de cet effort suprême.

Nous rencontrons la première application importante des découvertes de FARADAY, dans le domaine des communications à longue distance. Les câbles sous-marins commencèrent à se développer vers le milieu du dernier siècle et ce n'est pas par une simple coïncidence que cette période vit faire de rapides progrès aux premiers travaux tendant à l'établissement de l'Empire Britannique.

Les câbles constituaient les liens essentiels entre la mère patrie et son Empire d'outre-mer. C'est à leur développement, en même temps qu'à celui de la navigation à vapeur, que nous devons l'évolution de cet Empire dont les éléments étaient séparés les uns des autres par de grandes distances.

Dans ce domaine, l'industrie britannique trouva une vaste carrière conforme à son génie. Comme corollaire à la pose des câbles en eau profonde, nous vîmes des fabriques de câbles s'établir en Grande-Bretagne ; elles y formèrent le noyau d'une industrie constructive répondant, dans toutes les branches, à la demande d'appareils électriques.

Le progrès le plus important accompli en électricité fut l'invention de la dynamo et, peu de temps après, vers l'année 1880, celle de la lampe électrique à incandescence.

Dotée des moyens de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique et vice-versa et d'employer, sous une forme commode, l'électricité à l'éclairage, l'industrie électrique commença à prendre une part directe à la vie nationale.

La distribution publique d'électricité débuta par l'éclairage, puis elle s'étendit à l'énergie industrielle, à la traction, à la cuisine, au chauffage, au remplacement de la main-d'œuvre domestique.

Ces applications qui tiennent une si grande place aux yeux du public, qu'elles constituent, pour bien des gens, toute l'industrie électrique, déterminèrent une demande de plus en plus variée d'installations et d'appareils.

Nos fabricants de câbles mirent à profit l'expérience qu'ils avaient acquise dans le domaine sous-marin pour construire des câbles adoptés aux tensions plus élevées et aux courants plus intenses que nécessitait la distribution électrique.

Les hommes de science et les ingénieurs électriciens qui avaient marché sur les traces de FARADAY, portèrent leur attention sur les be-

soins de la nouvelle industrie pour les recherches, l'expérimentation et la production.

Toutes les conditions se prêtaient, en fait, et dans un nombre toujours croissant d'applications variées, au plein développement de la semence jetée par FARADAY.

En jetant un regard en arrière sur cette période de l'histoire de l'électricité, on peut se demander si cette industrie, qui était née et avait grandi dans notre pays, était à quelque degré appréciée à sa véritable valeur de richesse nationale.

Loin de trouver un encouragement auprès du gouvernement et des administrations publiques, les entreprises électriques furent ligotées à chaque tournant.

On imposa aux distributions d'électricité une législation si rigoureuse, que leur développement fut arrêté pour huit années environ.

Les entreprises de fourniture publique ne pouvant faire appel aux capitaux, nos constructeurs ne pouvaient recevoir de commandes.

C'est cela et cela seulement qui nous a valu le reproche d'être des retardataires, reproche dont la situation de notre pays au point de vue électrique ne s'est pas encore complètement libérée.

Peu de leçons, dans notre histoire industrielle, sont plus éloquentes que cet exemple des répercussions prolongées d'une législation animée des meilleures intentions du monde, mais entreprise avec des connaissances et avec un esprit de prévoyance insuffisants.

Un semblable manque de prévision des possibilités de l'électricité s'est manifesté à propos des tramways électriques. La traction urbaine est restée, malgré l'agitation créée pour sa réforme, soumise aux restrictions qui lui avait été imposées à l'époque de la traction animale.

Bien que les premières lignes de tramways électriques aient été construites en Grande-Bretagne, des obstacles législatifs s'opposaient encore à leur généralisation un grand nombre d'années après que les villes du Continent et de l'Amérique en avaient été pourvues.

Lorsqu'une nouvelle législation rendit possible, en 1888, un progrès dans la fourniture de l'électricité, l'industrie anglaise fit de son mieux pour réparer le temps perdu.

L'industrie de la construction, cependant, souffrit d'une manière aiguë de la perte de tant d'années qui lui auraient valu une expérience inappréciable, ainsi que du manque total de moyens de défense contre la concurrence étrangère; celle-ci avait accru sa capacité de production et sa réputation, pendant que l'industrie

électrique britannique était, de par son statut, condamnée à la stagnation.

Jusqu'à la déclaration de guerre, il n'y eut aucun relâchement dans l'intensité de la lutte, ni aucun signe que, soit dans les cercles gouvernementaux, soit dans le public, on se rendît compte que le sort de cette branche de la production eût la moindre importance pour le pays.

Je n'ai pas besoin d'appuyer sur les révélations que la guerre apporta touchant cette industrie et d'autres industries clefs. Le fait que nous dépendrions de la production étrangère fut universellement reconnu comme une faiblesse nationale; un plein encouragement fut donné à la constitution, par extensions ou par fusions, de groupes de constructeurs assez puissants pour satisfaire à toutes les demandes.

Sous ce vif stimulant, l'industrie électrique britannique s'approcha du niveau que, dans des conditions normales, elle aurait occupé bien des années auparavant.

A la même époque, le public prenait conscience du retard général de notre industrie électrique. Pendant la guerre, le débit des centrales électriques avait doublé. Malgré ce progrès remarquable, la consommation nationale d'électricité était encore bien en arrière de ce qu'elle aurait dû être dans un pays aussi industrialisé et possédant une population de 50 millions d'âmes.

Une enquête sur les causes de cette situation montra que les distributions d'énergie souffraient encore des restrictions législatives et qu'il était nécessaire de les réorganiser complètement, suivant les directives adoptées dans le domaine de la construction.

Trop de stations centrales isolées alimentaient des régions restreintes. Il fallait les interconnecter, étendre leurs territoires et rationaliser leurs méthodes de production.

En somme, pour la première fois, on abordait le problème au point de vue national.

Pour une première étape, les Commissaires de l'électricité furent chargés de coordonner les distributions électriques par la répartition du pays en territoires appropriés dans chacun desquels une autorité devrait, de concert avec les voisines, assurer une fourniture de courant abondante et à bon marché.

Les progrès furent lents: en 1926, une étape nouvelle et d'importance vitale, fut accomplie par la création du *Comité Central d'Elec-*

tricité, chargé de réaliser, sur une base nationale, la production du courant et de le livrer aux Compagnies locales par un réseau de lignes de transmissions principales; c'est ce que nous appelons aujourd'hui la « Grille ».

Le principe fondamental du *Comité Central d'Electricité* n'est pas seulement de réaliser la production sur la plus grande échelle possible. Une autre chose est encore nécessaire pour atteindre l'économie maximum dans la production de l'électricité et, par suite, le minimum de prix de vente au public :

Les demandes de courant de diverses catégories s'enchevêtrent dans une large mesure : par conséquent, une centrale qui alimente tous les genres d'industrie, transports, maisons de commerce, services publics, agriculture, éclairage, cuisine, chauffage, travaux domestiques, bénéficie d'un débit plus constant que celle dont la diversité est limitée.

Une station isolée, alimentant un territoire restreint, n'est pas si favorablement placée pour s'assurer une courbe horizontale de débit, que ne l'est un groupe de « Centrales » coopérant à la distribution sur un territoire beaucoup plus grand, où l'on peut profiter d'une variété plus grande de demandes.

Un nouveau pas est fait vers un meilleur rendement lorsque, comme cela se produit sous l'autorité du *Comité Central d'Electricité*, des groupes de centrales interconnectées par la Grille constituent effectivement un système national cohérent de production en vue de satisfaire à la totalité de la demande nationale.

Dans peu d'années, la « Grille » sera virtuellement complète, au prix d'une dépense d'environ 30 millions de livres.

Moyennant une immobilisation de capitaux relativement faible, le pays sera ainsi pourvu d'une source de courant à bon marché et susceptible d'être accrue jusqu'à pouvoir répondre à toute demande de la consommation.

A l'importance et à la diversité de cette consommation est lié le bon marché de la fourniture; je ne puis mieux exprimer l'intérêt public de ce progrès qu'en disant que si tous, industriels, ingénieurs des transports, hommes d'affaires, propriétaires, désirons intégrer à notre vie professionnelle et privée tous les bénéfices du génie créateur de Faraday, nous devons nous faire une vue aussi large que possible du problème de l'électricité et faire rentrer toute forme de consommation, sans exception aucune, dans notre projet national de distribution électrique.

Ceci m'amène encore à l'effort suprême dont j'ai déjà parlé.

Jusqu'à présent, la moisson électrique a été recueillie surtout sur les terrains industriel et domestique. Le domaine des transports n'a pas été exploité, sauf pour les tramways et sur 800 km environ de chemins de fer, surtout en banlieue, alors que l'ensemble de notre réseau ferré compte 32 000 km.

Pratiquement, l'ensemble de nos lignes principales est encore exploité à la vapeur. Nos « Alexandres » électriciens, soupirant après la conquête de nouveaux mondes, tournent naturellement les yeux avec intérêt vers les perspectives de l'électrification des chemins de fer. Les plus enthousiastes même de ces pionniers seraient toutefois forcés d'admettre que, jusqu'à une époque récente, les perspectives d'un changement aussi radical ne laissaient guère d'espoir. Ce qui a changé le caractère de l'entreprise, c'est la possibilité, ouverte par le *Comité Central d'Electricité*, de se procurer de l'énergie à bon marché et en quantité presque illimitée.

Ce changement est souligné par les directives que le gouvernement donna, il y a deux ans, à un Comité composé de Lord Weir, de Sir Ralph Wedgwood et de Sir William Maclintock. Ce Comité devait « étudier les progrès à réaliser en vue d'assurer une abondante distribution d'énergie électrique à haute tension, examiner les aspects, économiques et autres, de l'électrification des lignes de chemins de fer de Grande-Bretagne, en particulier celle des lignes principales et présenter ses conclusions en un rapport ».

Le Comité Weir a conclu que la proposition de transformer l'ensemble des réseaux de chemins de fer de ce pays, à l'exception de quelques petites lignes d'embranchement, est, économiquement, saine. « Nous croyons raisonnablement pouvoir prédire, dit le rapport, qu'en supposant l'électrification généralisée en 20 ans et le trafic maintenu à son chiffre actuel, il resterait, après paiement des intérêts, un excédent d'environ 2 pour cent du nouveau capital investi ».

Ceci place la question sur la base la plus terre à terre possible, en laissant de côté les conséquences du service plus rapide et plus satisfaisant qu'assurera l'exploitation électrique.

Plus nous étudions de près ces résultats, plus nous voyons se préciser l'assurance que l'électrification apporterait à nos réseaux le tonique qui leur est exactement nécessaire pour retrouver le trafic qu'ils ont perdu et connaître une ère nouvelle de prospérité. En d'autres termes, la généralisation des nouvelles méthodes que l'expérience centenaire de Faraday a rendues possibles, entraînera pour nos transports

nationaux une transformation aussi importante que celles dues aux inventions de STEPHENSON et de WATT.

Vu seulement sous l'angle des chemins de fer, ce programme est assez hardi et prometteur pour parler à notre imagination. Nos réseaux sont en face de l'alternative d'un déclin chronique, ou d'une résurrection par l'électrification. Ils doivent trouver le courage d'accomplir une réforme impliquant une dépense de quelques 15 millions de livres par an, pendant 20 ans : dépense qui nous apparaîtrait formidable, si nous ne nous rappelions qu'au cours des dix dernières années, nous avons dépensé cinq cent millions de livres pour nos routes, sans en attendre aucun profit direct.

Les actionnaires des réseaux apercevront, dans ce changement radical, le seul espoir solide de plus value pour leurs titres en baisse constante.

Les voyageurs y verront le seul moyen possible d'améliorer le service, les trains devant devenir plus rapides, plus fréquents et plus confortables.

L'homme d'Etat et l'industriel le salueront aussi comme un remède au chômage, apportant une source de commandes substantielles aux industries du fer et de l'acier ainsi qu'à d'autres aussi fondamentales.

Nous pourrions puiser, dans ces seuls motifs, un encouragement suffisant pour exécuter le programme de l'électrification complète ; mais il en est d'autres, d'une valeur encore plus grande et plus profonde. Nos réseaux, une fois électrifiés, consommeraient environ six millards de kilowattheures par an. Actuellement, la production totale de nos Centrales publiques est d'environ 11 milliards par an. Par conséquent nous avons, dans la consommation des réseaux par l'intermédiaire de la grille, un moyen d'accroître énormément la fourniture totale de courant électrique.

De plus, la consommation des réseaux de traction s'étend sur 24 heures et elle s'enchevêtre si bien avec les autres catégories de demandes industrielles et domestiques, qu'elle améliorera grandement la continuité et, par suite, l'économie de la production.

En résumé, l'électrification des chemins de fer fera beaucoup plus que toute autre application pour abaisser le prix du courant au profit de l'ensemble des consommateurs.

Une telle réduction de prix aura trois conséquences particulièrement bienfaisantes.

En premier lieu, le prix moindre du courant aidera à abaisser le prix de revient dans toutes les branches de l'industrie. Il y a en outre,

beaucoup d'applications de l'électricité, en particulier celles des fours électriques pour la préparation du fer, de l'acier et d'autres métaux, de l'électrochimie, du chauffage industriel qui, rares actuellement, n'attendent qu'une réduction du coût du kilowattheure pour se généraliser et entraîner l'établissement de nouvelles industries.

En second lieu, le courant à meilleur marché c'est la mise à la portée de toutes les classes des avantages de la maison complètement électrifiée, où l'emploi le plus complet est fait de l'électricité pour l'éclairage, la cuisine, le chauffage, y compris celui de l'eau et l'économie de main-d'œuvre domestique. Le progrès en ce domaine est sérieux ; il n'a besoin que de l'aiguillon d'un prix meilleur, pour devenir rapide.

En troisième lieu, un nouveau domaine pratique s'ouvrira rapidement à l'électrotechnique lorsque le courant à bon marché sera plus répandu. Les applications rurales de l'électricité dans les districts agricoles ont été retardées, en partie faute de réseaux de distribution, en partie par l'élévation relative du prix de revient pour l'alimentation de petits consommateurs dispersés.

L'électrification des chemins de fer fera pénétrer les feeders à peu près dans toutes les régions du pays et, par sa répercussion sur les prix, elle permettra de mettre à la disposition du fermier et du résident rural, de l'énergie à bon marché qu'il pourra employer à son gré et pour toutes applications.

Au lieu d'être un phénomène isolé dans quelques districts favorisés, l'électrification rurale deviendra universelle. Il est bon de noter que toutes ces extensions entraîneront un bénéfice mutuel et cumulatif.

Tout accroissement de consommation de courant, résultant d'un abaissement de son prix, se traduit par des économies sur le prix de revient qui rendent possibles de nouvelles réductions.

La question de savoir si nos réseaux doivent ou non entrer dans la voie de l'électrification, est donc de celles qui intéressent tout le monde en ce pays.

Elle est d'une importance nationale et je ne crois pas que, pour la traiter, nous puissions trouver une meilleure source d'inspiration que le centenaire de Faraday. En honorant cet humble travailleur dans le domaine de la science pure, nous sommes amenés à passer en revue les inappréciables profits qu'il nous a assurés et à nous rendre compte de la responsabilité qui nous incombe d'avoir à poursuivre courageusement et avec une claire vision, l'œuvre civilisatrice qu'il a commencée.

LA LIQUÉFACTION DES GAZ

DU CHLORE A L'HELIUM

Emplois industriels

par le Professeur J. C. Mac Lennan, F. R. S.

On peut dire qu'avec la liquéfaction du gaz hélium et sa solidification finale par le Professeur Keesom, le 26 juin 1926, la dernière page a été écrite du chapitre d'une brillante conquête de la science, chapitre dont les premiers paragraphes relataient les expériences et les découvertes de Michel Faraday à la *Royal Institution*, au début du XIX[e] siècle.

C'est Lavoisier qui suggéra à ses contemporains, sceptiques sans doute, que si la terre était suffisamment refroidie, l'air même qui l'entoure pourrait se liquéfier ; mais bien des années devaient passer avant que la liquéfaction des gaz fût obtenue au laboratoire.

Sir Humphry Davy et son jeune préparateur, Faraday, découvrirent que le chlore gazeux, préparé en chauffant l'hydrate en tube scellé, se condensait en un liquide jaune. L'ammoniaque, l'hydrogène sulfuré et le gaz chlorhydrique cédèrent bientôt à leur habileté expérimentale et, vers 1823, Faraday avait installé à la *Royal Institution* ce que l'on pourrait vraiment appeler une usine de liquéfaction.

Les progrès furent rapides dans la technique et dans l'étendue des applications. Les petits cylindres qui nous servent à recharger les siphons de soda, la glace ou la neige sèche, si employée dans les hôpitaux, nous ont familiarisés aujourd'hui avec les états liquide et solide de l'acide carbonique, gazeux dans les conditions normales ; mais c'est en 1834 que Thilorier les fit connaître au monde. Faraday mit rapidement à profit ces nouvelles découvertes. En ajoutant de l'éther à la neige d'acide carbonique, il obtint un mélange réfrigérant ; en y enfonçant des tubes d'essai, il réussit à les refroidir jusqu'à — 110° C, température de beaucoup inférieure à celles que l'on rencontre normalement sur notre terre.

Un champ de recherches, riche de possibilités aussi nouvelles qu'étranges, s'ouvrait devant les physiciens et les chimistes de cette époque. Les gaz mêmes de l'atmosphère : l'oxygène et l'azote, l'hydrogène et les autres gaz qui avaient si longtemps résisté à toutes les tentatives de liquéfaction, céderaient-ils aux nouvelles températures si basses que la science réalisait maintenant, ou étaient-ils réellement permanents comme tant de savants le pensaient ? Thomas Andrews, Professeur de chimie à Belfast, essaya de les liquéfier, mais comme beaucoup d'autres avant lui, il échoua ; cependant il sut, de son échec même, tirer un succès. Dans l'une des conférences bakériennes, à la *Royal Society*, il exposa l'application de sa méthode expérimentale à l'acide carbonique (son appareil original est aujourd'hui au musée de South Kensington). Ses expériences montraient que, dans la liquéfaction d'un gaz, ce n'est pas seulement la température, mais aussi la pression à laquelle il est soumis, qui jouent un rôle essentiel. C'était la clef de la porte jusqu'alors fermée ; tant que la pression ne dépassait pas une certaine valeur critique, particulière à chaque gaz, on ne pouvait espérer le liquéfier ; le froid associé à la compression pouvait réussir, alors que l'emploi d'une seule de ces conditions échouait.

A partir de ce moment, se déroule une série de triomphes ; les gaz cèdent les uns après les autres aux progrès scientifiques. L'oxygène est liquéfié par Olszewski en 1883 ; deux années plus tard, il est démontré que l'azote et l'oxyde de carbone ne sont nullement permanents, en sorte que « l'air liquide », rêvé par Lavoisier, est devenu une réalité.

La liste des températures de plus en plus basses successivement atteintes, se lit comme une suite de performances athlétiques ; dans un domaine comme dans l'autre, le dernier pas est toujours plus difficile à accomplir que celui qui l'a précédé.

Un nouveau principe fut appliqué pour produire le refroidissement, principe qui est la base même de nos méthodes modernes de réfrigération.

Quiconque s'est servi d'une pompe à bicyclette doit avoir remarqué que la compression d'un gaz développe de la chaleur et élève sa température ; la réalité du phénomène inverse n'est peut-être pas aussi connue. Si on laisse se détendre un gaz comprimé, il se refroidit et il peut atteindre sa température de liquéfaction. Une combinaison ingénieuse d'appareils utilise le gaz ainsi refroidi pour abaisser la température du gaz qui arrive et qui, en se détendant à son tour,

descend à une température encore plus basse, jusqu'à ce qu'il finisse par se liquéfier.

C'est ainsi que l'hydrogène fut enfin liquéfié par OLSZEWSKI en 1892 ; il ne restait plus alors, de toutes les substances connues, que le gaz hélium qui n'eût pas encore été condensé.

L'hydrogène se liquéfie à — 253° C, soit à vingt degrés seulement au-dessus de ce que nous appelons le zéro absolu de température, mais ces vingt derniers degrés sont beaucoup plus difficiles à obtenir que 20 degrés à la température normale. Pratiquement, tous les facteurs concourant à empêcher le refroidissement supplémentaire prennent alors plus d'importance. Ce n'est que par l'emploi de la bouteille à vide, invention de DEWAR, que l'on a pu empêcher l'accès de la chaleur émanant des corps voisins ; de fait, sans cette invention, tous les progrès accomplis dans la liquéfaction auraient bientôt atteint leur limite.

Tous les gaz étrangers, existant dans l'hélium à l'état d'impuretés, doivent en être extraits, sinon l'appareil s'encombre bientôt de corps solides, puisqu'à — 253° C l'hydrogène lui-même se solidifie.

Ce fut à Leyde, en 1908, dans les laboratoires du Professeur KAMERLINGH ONNES, que l'on arriva enfin au but. A — 268° C, soit 5° C seulement au-dessus du zéro absolu, la première goutte d'hélium liquide tomba dans un flacon récepteur ; elle ressemblait beaucoup à une simple goutte d'eau, mais elle représentait l'aboutissement d'un labeur de cent années.

Il y a loin des expériences relativement simples de FARADAY, à la marche d'une usine de liquéfaction d'hélium, mais pour produire celui-ci, nous devons d'abord liquéfier l'air, puis nous en servir pour refroidir l'appareil de liquéfaction de l'hydrogène qui permet celle de l'hélium. Ainsi, chacun des progrès nouveaux s'est appuyé sur les travaux antérieurs.

En abaissant la pression au-dessus de l'hélium liquide, on peut atteindre des températures encore plus basses ; c'est ainsi que KEESOM réussit à solidifier l'hélium à une température évaluée à — 272° C, soit 1° C seulement au-dessus du zéro absolu. L'homme a achevé sa conquête. Toutes les substances connues se sont soumises à sa volonté ; à une température de cet ordre, toutes les matières sont solides : il n'existe plus ni gaz ni liquide.

Mais les possibilités que contient la recherche des basses températures sont encore inconnues. Dans les laboratoires équipés comme

ceux de Leyde, de Toronto, de Berlin et comme celui qui sera bientôt établi à Cambridge, l'expérience révèle, aux basses températures, de nouvelles propriétés ignorées dans les conditions normales et qui peuvent être utiles à l'humanité. La liquéfaction des gaz ne présente pas seulement un intérêt scientifique ; elle joue un grand rôle dans la vie industrielle moderne.

Tout dépend, en effet, de la liquéfaction des gaz, depuis la réfrigération, avec ses multiples applications, la production à grande échelle de l'oxygène et des gaz rares, employés dans les enseignes lumineuses, le transport et l'accumulation de gaz comme l'acétylène, jusqu'au maintien des pistes de patinage. Michel Faraday, en expérimentant sur son tube scellé rempli de chlore gazeux, a ouvert une porte sur un monde dont il pouvait à peine rêver.

LA TRANSMISSION DE L'ÉNERGIE

CABLES DE DIVERS TYPES

Les Problèmes de l'isolement

par Sir Alexander Roger

L'histoire des progrès dans la construction des câbles pour transport d'énergie n'est qu'une suite ininterrompue de succès remarquables obtenus dans l'art et dans la science des fabrications en vue de satisfaire aux exigences sans cesse croissantes des transports à haute tension.

Entre 1880 et 1890, les conducteurs pour distribution d'énergie étaient généralement suspendus en l'air, mais l'aspect désagréable des poteaux et des fils n'était pas populaire chez nous, aussi les fabricants de câbles s'occupèrent-ils activement de perfectionner les conducteurs isolés pouvant être placés sous le sol des rues.

Toutefois, l'emploi des câbles à haute tension ne fit guère de progrès, jusqu'à l'amendement apporté à la loi Chamberlain de 1882 par la loi de 1888 sur l'éclairage électrique qui, entre autres réformes, porta la durée des concessions à 42 ans.

Elle apportait un encouragement considérable à la distribution d'électricité et elle fut suivie de l'exécution, à Deptford, du fameux projet de S. Z. de Ferranti, comportant une installation de production et de transport à 11 000 V, la première de ce type en Angleterre.

Jusque-là, les transmissions et les distributions s'étaient faites à des tensions ne dépassant pas 6 000 V ; on pouvait donc se contenter, jusqu'à un certain point, de conducteurs isolés au caoutchouc vulcanisé, au bitume ou au jute imprégné. L'adoption d'une tension supérieure entraînait celle de nouveaux matériaux, présentant une perte diélectrique moindre que ceux employés jusqu'alors. La matière choisie par de Ferranti fut le papier imprégné, de caractéristiques semblables à celles du papier imprégné qui, à cette époque, venait d'être introduit dans la fabrication des câbles isolés au papier sous plomb. Des câbles

isolés au papier, fabriqués dans les premières années qui suivirent 1890, fonctionnent encore avec succès dans notre pays. Les avantages qu'ils présentaient sur les autres types furent promptement reconnus par les dirigeants des usines productrices d'électricité, aussi bien chez nous qu'à l'étranger et on commença bientôt à en fabriquer dans divers pays. L'emploi, presque universel, de ce type de câble est dû à la sécurité qu'il présente.

La tenue satisfaisante, sur les réseaux de plusieurs Compagnies de distribution, de câbles concentriques et de câbles à 3 conducteurs à 11 000 V, poussa à envisager l'emploi de tensions plus élevées et conduisit à des progrès importants. En 1905, la très allante Compagnie de Newcastle Electric Supply fut la première à installer des câbles triphasés à 20 000 V. Un grand nombre de kilomètres de ces câbles ont été fabriqués en Angleterre ; toutefois, le développement et l'emploi de câbles pour tensions supérieures fut sérieusement retardé, non seulement par la grande guerre, mais aussi par le fait que, jusqu'au récent projet de Grille nationale, prévue pour fonctionner à une tension de service de 132 000 V, le besoin de câbles à haute tension ne se faisait réellement pas sentir en ce pays, en raison des courtes distances auxquelles l'énergie devait être transportée.

Malgré cela, cependant, quelques progrès furent accomplis et les premiers câbles à 3 conducteurs sous 33 000 V employés en Grande-Bretagne furent posés en novembre 1921, par la Mersey Power Company ; ils ont assuré depuis un service ininterrompu. Ce type de câble, dit ceinturé, qui était jadis employé d'ordinaire en tous pays pour ce genre de service, ne s'est pas montré entièrement satisfaisant. Il a maintenant été remplacé par le type « H » dans lequel les efforts diélectriques sont uniquement radiaux ; on supprime ainsi les efforts tangentiels, qui ont produit quelques troubles dans certaines installations en câbles ceinturés.

Presque tous les fabricants de câbles à 33 000 V adoptent maintenant le type « H » sous forme, soit de 3 conducteurs métallisés, placés sous une même couche de plomb (type « H ») soit de 3 câbles simples sous plomb, tordus ensemble (type « S. L. »).

L'essai satisfaisant des câbles à 33 000 V fut suivi, au cours des 4 années suivantes, de l'installation de câbles à 66 000 V. En 1925, la Newcastle Electric Supply Company demanda aux fabricants de lui fournir des lignes triphasées à 66 000 V et, depuis cette date, un grand nombre de kilomètres de ces derniers câbles ont été posés sur le réseau de la Compagnie et exploités avec succès.

Au cours de ces dernières années, une intéressante et importante amélioration fut apportée aux câbles à haute tension par M. EMANUELI, de Milan. Le nouveau câble, à un ou plusieurs conducteurs, est muni de dispositifs destinés à maintenir, en toutes conditions d'exploitation, le diélectrique rempli d'huile isolante. Le *Comité Central d'Electricité* installe dans la région de Londres des câbles à huile de ce type, fabriqués en Angleterre et travaillant à 132 000 V ou 66 000 V, tandis que sur la côte Nord-Est, des réseaux de ces mêmes câbles sont posés à la fois par le *Comité Central d'électricité* et par la Newcastle Electric Supply Company.

Dans la région de Londres, des câbles de ce type, en même temps que des câbles à isolant compact, sont exploités avec succès en triphasé 66 000 V, tandis qu'à l'étranger des longueurs restreintes de câbles à 3 conducteurs du type à huile ont été mises en service sur des réseaux à 35 000, 66 000 et 75 000 V. Quelques installations de câbles type « H » à 3 conducteurs pour 66 000 V ont été aussi réalisées en France et en Allemagne. Les qualités remarquables des câbles isolés au papier fabriqués en Angleterre sont dues, dans une large mesure, au grand soin apporté à leur fabrication et au fait que l'*Association Britannique de Normalisation* a normalisé de bonne heure les épaisseurs de diélectrique pour les câbles jusqu'à 11 000 V. Avec son expérience accumulée et sans cesse accrue d'une réglementation à l'autre, cette Association s'occupe maintenant, sur l'initiative de l'Association des fabricants de câbles, d'une nouvelle révision complète des spécifications. Cette révision a paru aux fabricants être justifiée par la bonne marche des installations dans lesquelles l'épaisseur du diélectrique des câbles est inférieure au chiffre normalisé et aussi par le fait qu'elle apportera à la réduction des immobilisations dans l'industrie électrique une opportune contribution, favorable au progrès ainsi qu'à l'extension des emplois de l'électricité. En dehors de l'action de l'*Association Britannique de normalisation*, la technique de l'industrie des câbles a été influencée par l'*Association des Recherches Electriques*, par l'*Association Britannique de recherches sur les métaux non ferreux*, et par le *Comité de recherches sur les câbles.*

Tandis que les câbles isolés au papier sont aujourd'hui employés le plus souvent pour le transport et la distribution et qu'ils le sont aussi, dans une mesure restreinte, mais avec un plein succès, pour l'installation intérieure des bâtiments, des usines et des maisons particulières, la plupart de ces installations intérieures sont, dans notre pays, exécu-

tées en câbles isolés au caoutchouc. Ceux-ci sont d'ordinaire conformes aux spécifications des normes britanniques et vendus sous les auspices de l'Association des fabricants de câbles. Cette Association a accompli une œuvre immense en maintenant, pendant nombre d'années, la haute qualité du produit.

Une vue d'ensemble sur l'industrie des câbles pour transmission d'énergie ne serait pas complète sans quelques statistiques.

Ils se sont constamment développés pendant une période de 25 ans et il est probablement exact de dire qu'en 1930 la production en câbles de tous genres pour le transport de l'énergie et en câbles et fils isolés au caoutchouc pour les installations intérieures, a quadruplé depuis un quart de siècle, aussi bien pour le commerce intérieur que pour l'exportation.

D'autre part, les importations de câbles de ces divers types ont augmenté aussi et au moins dans les mêmes proportions ; beaucoup de ces câbles importés, sinon leur totalité, pourraient être fabriqués chez nous, ce qui apporterait des bénéfices correspondants à notre industrie et à notre main-d'œuvre.

TÉLÉGRAPHIE ET TÉLÉPHONIE

DE L'APPAREIL MORSE AU TÉLÉTYPE

Conversations mondiales

par le Colonel Thomas Purves

L'industrie des communications électriques n'est pas moins redevable aux principes naturels révélés par l'œuvre fondamentale de Faraday, que les autres applications remarquables faites de la science au service de l'humanité. La transmission instantanée et l'échange d'idées et d'informations sur toute la surface du globe frappent au plus haut point l'imagination ; ils représentent, en même temps, dans l'organisation du monde moderne des affaires, une contribution qui peut difficilement être surestimée.

Les premières inventions et les premiers progrès de la télégraphie, basés sur les découvertes des anciens pionniers, étaient indépendants des travaux de Faraday : Volta, vers 1792, avait réalisé sa batterie ; Oersted, en 1819 et 1820, avait fait connaître sa première découverte sur les relations entre le magnétisme et l'électricité et sur l'action d'un courant électrique sur une aiguille aimantée ; Sturgeon en 1825, avait inventé l'électro-aimant et Henry, en 1831, en avait à tel point perfectionné la construction, qu'il pouvait recevoir, à l'extrémité d'une longue ligne, les signaux émis. Les éléments essentiels d'une ligne télégraphique existaient donc déjà lorsque Faraday fit connaître au monde sa grande et féconde découverte de l'induction électro-magnétique.

L'invention de la pile Daniell, en 1836, facilita beaucoup le développement du télégraphe, en fournissant une source constante et sûre de courant électrique. En 1837, Cooke et Wheatstone inventaient le système télégraphique à aiguilles multiples qui, sous sa dernière forme, devint le système à aiguille unique.

Il est intéressant de noter que Faraday fut appelé à se prononcer comme arbitre expert sur un système à aiguilles multiples, inventé vers la même époque par William Davy et dont la demande de bre-

vet était attaquée par Cooke et Wheatstone. Faraday se prononça en faveur des revendications de Davy et le brevet fut accordé. La même année, Steinheil avait découvert que la terre peut servir de conducteur de retour dans un circuit télégraphique et Morse avait imaginé l'alphabet de points et de traits qui porte son nom ; l'année 1837 peut donc être regardée comme celle où le télégraphe fut lancé dans le monde sous une forme commerciale pratique.

De quelques systèmes primitifs.

La première application télégraphique de la découverte fondamentale de l'induction électro-magnétique par Faraday fut le système A. B. C. imaginé par Wheatstone en 1840 ; des courants alternatifs étaient engendrés par la rotation d'une armature de fer doux devant des bobines enroulées sur les pièces polaires d'un puissant aimant permanent. D'autres événements saillants du début de la télégraphie furent : l'introduction par Gintl, en 1853, de la première méthode pratique d'exploitation en duplex ; l'invention, faite séparément par Frischen et par Siemens, en 1854, des principes du duplex différentiel; le système duplex de Stark en 1855 qui, en permettant d'envoyer simultanément deux messages dans la même direction, constituait un premier pas vers la réalisation de la télégraphie en quadruplex ; l'appareil imprimeur de Hughes, inventé en 1850 et qui est encore d'un usage journalier ; le système automatique Wheatstone à grande vitesse, inventé en 1868 ; le système imprimeur multiplex Baudot avec son alphabet à cinq unités, inventé en 1874 et le système multiplex Delany, qui utilisait l'alphabet Morse et qui fut exploité par le *Post-Office britannique de* 1886 à 1903.

Les développements ultérieurs de la télégraphie ont été très largement liés au perfectionnement des systèmes télégraphiques à machine, qui utilisent tous, dans l'une ou l'autre de leurs fonctions essentielles, le phénomène d'induction électromagnétique découvert par Faraday.

Ces systèmes, qui sont innombrables, permettent d'imprimer en colonnes ou sur ruban les messages reçus et comportent des dispositifs automatiques où un transmetteur à grande vitesse est contrôlé par un ruban perforé ou encore des systèmes multiplex où plusieurs transmissions à faible vitesse sont assurées simultanément par la manipulation de transmetteurs munis d'un clavier de machine à écrire.

Un des plus remarquables parmi ces derniers est le système moderne à « fréquence tonique », au moyen duquel 12 fréquences ou plus, comprises dans la zone audible, peuvent être transmises simultanément sur un seul circuit et assurent des transmissions télégraphiques indépendantes. Ce système est régulièrement employé entre Londres et Manchester et entre Londres et Glasgow.

Dans les deux cas, le circuit permet 6 transmissions dans chaque sens.

Les systèmes automatiques à grande vitesse et les systèmes multiplex ont été imaginés dans le but d'obtenir le trafic maximum que peuvent donner électriquement les circuits télégraphiques, longs et dispendieux. Mais l'opportunité de cette politique se trouve influencée par un nouveau facteur qui commence à entrer de plus en plus en jeu, en raison du développement continu des réseaux téléphoniques.

Un nombre toujours croissant de lignes principales, en câbles souterrains, relient maintenant les principaux centres de population. Le spectre des fréquences de courants alternatifs que les lignes peuvent transporter, n'est pas complètement utilisé pour la transmission de la parole, les fréquences inférieures à 200 p:s ne contribuant guère à la qualité ou à l'intelligibilité de la parole transmise. La bande des fréquences inférieures à 200 p:s, appelée quelquefois bande sous-audible, est toutefois à même de répondre à tous les besoins des appareils télégraphiques à manipulation manuelle, jusqu'à environ 60 mots par minute et la pratique qui consiste à les réserver pour ce service tend à se généraliser.

Par l'emploi de filtres de fréquence convenables, toute ligne téléphonique principale peut ainsi être utilisée simultanément pour le service télégraphique, sans gêner les autres.

Un autre moyen d'utiliser un groupe de lignes téléphoniques pour en obtenir, comme sous-produit en quelque sorte, des transmissions télégraphiques, est de constituer des circuits super-fantômes. Il est de pratique courante de superposer un troisième circuit de conversation à deux circuits téléphoniques, en utilisant les deux conducteurs de chacun d'eux comme l'un des conducteurs d'un circuit combiné, ou fantôme. Sur le même principe, on peut former un circuit super-fantôme en combinant deux circuits fantômes. La complication qui en résulterait, jointe à la nécessité de placer des bobines de charge inductives à de courts intervalles sur les longs circuits téléphoniques souterrains, rendrait peu économique la formation de cir-

cuits super-fantômes pour communications téléphoniques, du moins dans les conditions normales ; mais pour les communications télégraphiques, les circuits peuvent être utilisés sans aucun équipement supplémentaire de bobines de charge.

Dans les régions dotées d'un réseau de câbles important, le nombre des circuits télégraphiques dont on dispose ainsi est si grand qu'il n'est plus nécessaire d'augmenter le trafic par ligne en recourant aux appareils automatiques à grande vitesse, ou multiplex ; on peut faire porter les efforts sur la réalisation d'appareils de types robustes pour communication unique qui assureront le meilleur trafic possible par agent manipulateur, simplifieront l'entretien et réduiront la durée de transmission des télégrammes individuels. Ces besoins ont été complètement satisfaits par l'introduction, sous deux ou trois formes, du télétype.

A l'heure actuelle, le *Post-Office britannique* a entrepris l'exécution d'un programme d'extension comportant le remplacement, dans le service télégraphique intérieur, des appareils Morse et des multiplex Baudot par des télétypes munis d'un clavier de machine à écrire à trois rangs. On compte, par ce procédé, pouvoir éliminer avant peu, le système Morse du service des grands centres commerciaux.

De même, dans les régions rurales, le système Morse sera remplacé par la transmission téléphonique des télégrammes en « phonogrammes. » La marche des événements, qui conduit rapidement à la suppression du Morse, s'impose entièrement à la raison, mais nombreux sont ceux, dont je suis, qui constatent avec un profond sentiment de regret, la descente vers l'oubli du télégraphiste Morse ; c'était un homme d'une personnalité fortement accusée et pittoresque, d'une grande habileté, plein d'enthousiasme et d'un remarquable esprit de corps professionnel.

Il est probable que le système multiplex de Baudot et, dans une moindre mesure, le système imprimeur de Hughes, continueront à être employés longtemps encore sur les circuits anglo-continentaux.

Un procédé qui sera certainement fort utilisé dans l'avenir est celui de la transmission télégraphique des fac-similés ou des images. Plusieurs systèmes de ce genre ont été récemment amenés à un haut degré d'efficacité. Tous reposent sur la transformation en sa contrepartie électrique, au moyen d'une cellule photo-électrique, d'un faisceau lumineux balayant rapidement toute la surface de la figure à transmettre.

A l'extrémité réceptrice, l'intensité du faisceau de lumière, qui reproduit l'image, est réglée grâce à l'application d'une découverte de FARADAY : la rotation du plan de polarisation de la lumière sous l'influence du champ magnétique.

Des circuits télégraphiques publics, équipés pour la transmission des dessins, des manuscrits, des dactylographies ou des imprimés, fonctionnent entre Londres et Berlin, Munich, Copenhague, Francfort, Stockholm et Vienne.

Plusieurs journaux anglais emploient aussi ce procédé pour transmettre des dessins par fil spécial. Il est indispensable, pour le faire, de disposer de circuits téléphoniques de première qualité. La vitesse de transmission des systèmes actuellement employés est trop faible, mais des progrès notables sont déjà en vue. On peut envisager, avec confiance, la réalisation de procédés permettant d'introduire rapidement et d'une manière continue dans une machine placée à une extrémité de la ligne, des dessins, peintures, lettres, imprimés, et d'obtenir à l'autre extrémité leur reproduction claire et exacte.

Un nouveau progrès intéressant, envisagé actuellement par le *Post-Office britannique*, est l'établissement à Londres et dans d'autres grandes cités, d'un service de communications par télétype. On espère pouvoir adjoindre ce service au service téléphonique, en utilisant les lignes et bureaux existants. Un abonné au service télétype pourra obtenir, au moyen de son téléphone ordinaire, la communication avec le bureau de l'abonné demandé. Les deux abonnés se mettront alors sur le télétype et le message sera transmis dactylographié. Si l'on reconnaissait comme impraticable d'adapter ce système d'une manière satisfaisante sur les lignes téléphoniques, il serait installé un réseau spécial de télétype.

Si nous nous tournons vers le sujet connexe de la téléphonie, on peut remarquer que le premier téléphone pratique, imaginé par ALEXANDRE GRAHAM BELL en 1876, constituait une belle application de la découverte de l'induction électromagnétique, faite par FARADAY 45 ans plus tôt. Le transmetteur primitif de BELL utilisait un diaphragme de fer vibrant devant les pôles d'un aimant permanent en fer à cheval, sous l'influence des ondes produites dans l'air par la voix. Les variations de flux magnétique ainsi produites étaient transformées, par induction, en courants électriques alternatifs, dans une bobine entourant les pièces polaires de l'aimant et reliée à la ligne. Le même dispositif existait aussi sur le récepteur; dans ce cas, grâce

à l'exacte réversibilité du phénomène, les courants pénétrant dans le récepteur y faisaient varier la densité de flux du champ magnétique où était placé le diaphragme; ils déterminaient ainsi des vibrations qui engendraient dans l'air des ondes correspondant à celles des paroles prononcées à l'autre extrémité.

Les récepteurs téléphoniques employés aujourd'hui sont basés exactement sur les mêmes principes et ne diffèrent que par des détails secondaires des appareils inventés par Bell, il y a 55 ans. Toutefois, l'emploi de ce dispositif comme transmetteur n'eut qu'une brève durée. L'énergie qu'il engendrait était faible et Bell reconnut rapidement qu'il obtiendrait de bien meilleurs résultats en employant une batterie comme source d'énergie et en utilisant les déplacements du diaphragme mobile pour produire des pulsations électriques en faisant varier la résistance insérée dans le circuit.

Il construisit un transmetteur dont le diaphragme, placé horizontalement, portait en son centre une courte tige affleurant la surface d'eau acidulée, ou de quelque autre liquide approprié contenu dans une petite coupe ; le diaphragme, la tige et le liquide étaient mis directement en circuit avec la batterie et les mouvements du diaphragme faisaient ainsi varier la résistance de l'ensemble avec la surface immergée de la tige.

L'invention, faite à la même époque par Edison, du transmetteur à charbon, dans lequel les vibrations du diaphragme faisaient varier la pression exercée sur une pointe de charbon, constituait un progrès encore plus marqué ; combiné avec les études de Hugues, de Berliner et de beaucoup d'autres, sur les contacts superficiels multiples, elle conduisit à la réalisation du transmetteur moderne à carbone granulé.

L'introduction, due à Edison, de la bobine d'induction pour limiter la résistance placée directement sur le circuit du transmetteur et augmenter la tension des courants envoyés en ligne, constitua un progrès d'extrême importance, qui associa encore plus étroitement le nom de Faraday à la téléphonie.

* * *

L'invention primitive du téléphone par Bell fut suivie, aux Etats-Unis, d'un rapide développement et de l'organisation d'un grand et indispensable service public, mis à la disposition de toutes les nations du monde. L'exposé de la technique de la téléphonie et le rappel de la volumineuse bibliographie qui s'y réfère, constituent un sujet trop vaste pour pouvoir être résumé, même brièvement, dans un article de cette nature.

Plusieurs milliers d'ingénieurs ont coopéré à l'étude et au perfectionnement de ces installations complexes, qu'elles aient été à systèmes manuels ou à systèmes automatiques, ceux-ci se substituant rapidement aux premiers.

De temps à autre, de nouvelles découvertes scientifiques, ouvrant de nouvelles voies au progrès, ont contribué à étendre la portée et la généralisation de la téléphonie. Tels furent, par exemple : l'amélioration de la qualité des lignes de transmission par l'introduction des charges inductives basées sur les recherches mathématiques d'Oliver Heaviside et auxquelles Pupin a donné le premier une forme pratique ; l'invention de la lampe thermo-ionique par Sir Ambrose Fleming et sa transformation en amplificateur téléphonique par de Forest ; l'exploration et le contrôle du spectre des ondes électromagnétiques qui ont conduit aux filtres électriques, aux correcteurs de phase, aux égalisateurs d'atténuation, aux suppresseurs d'échos et ainsi de suite ; la modulation des ondes hertziennes par la parole, qui a permis le développement de la radio-téléphonie et, récemment, la liaison des transmissions par radio avec les circuits terrestres ; ainsi ont été réunis, en un seul système d'inter-communications, plus de 92 pour cent des abonnés téléphoniques du monde entier et un nombre rapidement croissant des navires qui fendent les mers.

La découverte de l'écran électrostatique par Faraday a trouvé une application dans la protection des circuits de câbles téléphoniques modernes contre les interférences inductives et dans les procédés de protection par écrans, si largement employés dans les transmetteurs et récepteurs radio-téléphoniques.

La tâche du *Post-Office britannique* dans le développement de la radio-téléphonie a, pour but essentiel, son utilisation dans le réseau général d'inter-communications public, dont il a la charge. Les liaisons téléphoniques avec les réseaux des autres pays restèrent limitées aux distances pouvant être franchies par câbles sous marins, jusqu'à ce que, en janvier 1927, une liaison par radio fut ouverte au service public général entre Londres et New-York.

Cette liaison, qui travaille sur onde porteuse de 5 000 m dans chaque direction a, depuis, été complétée par l'addition de trois autres circuits, employant des bandes d'ondes courtes alternatives et dirigées, de longueurs comprises entre 15 et 44 m.

Grâce à ces liaisons, l'Amérique du Nord dispose d'une connexion téléphonique, via Londres, avec toute l'Europe. Le secret des communications est efficacement assuré dans le service à ondes longues, en

divisant la bande des fréquences vocales en plusieurs autres, qui sont « brouillées » avant leur émission par la station transmettrice et rétablies à la station réceptrice, avant de passer sur les lignes terrestres.

Sur les transmissions à ondes courtes, on obtient le même résultat en inversant complètement la bande de fréquence vocale. On espère qu'un câble sous-marin, susceptible de transmettre les conversations téléphoniques entre la Grande Bretagne et les Etats-Unis, pourra être bientôt construit et s'ajoutera au groupe des circuits téléphoniques transatlantiques disponibles.

Un service radio-téléphonique à ondes courtes a été ouvert entre la Grande Bretagne et l'Australie en avril 1930. Il est employé aussi pour le service entre l'Australie et l'Amérique, en passant par Londres et pour le service avec la Nouvelle Zélande, en passant par l'Australie. Le service direct sur Rio de Janeiro a été ouvert en mai 1930, sur Buenos-Aires en décembre 1930 et un service direct sur le Canada le sera bientôt. Les services sur l'Inde, l'Afrique du Sud et l'Egypte sont aussi en préparation, pour s'ouvrir probablement avant 12 mois. Des essais sont en cours, en vue d'établir le service entre la Grande Bretagne, Java et le Japon. On envisage aussi un service pour Singapour, desservant Shanghaï. Des services radio-téléphoniques à ondes courtes, dont peut se servir le commerce britannique, fonctionnent aussi entre l'Amérique du Sud et l'Espagne, la France et l'Allemagne, la Hollande et Java. l'Allemagne et le Siam, la France et l'Indo-Chine. Il existe aussi une communication radio-téléphonique, directe entre l'Amérique du Nord et l'Amérique du Sud. Le service entre le réseau téléphonique de Grande Bretagne et les navires traversant l'Atlantique, a été ouvert en février 1930.

Je ne puis, ici, que mentionner les recherches scientifiques poursuivies sur les lampes thermo-ioniques : les circuits couplés, le contrôle des fréquences, la radiogoniométrie et tant d'autres qui se sont succédé en contribuant au développement de la science de la radio. On peut prévoir que ce développement rapide continuera, reliant toutes les parties du monde au réseau téléphonique général, en communication, d'autre part, avec des postes mobiles, complètement équipés, à bord des navires et des avions. On peut s'attendre aussi à ce que l'évolution de systèmes de transmission plus complètement directifs, basés peut-être sur l'emploi d'ondes ultra-courtes, atténuera les difficultés des voyages sur mer, ou dans l'air, par temps de brouillard ou de visibilité réduite.

Nous avons noté le lien étroit existant entre toute l'organisation des communications électriques et les découvertes fondamentales de FARADAY ; il peut être encore intéressant de mentionner que sa personnalité a été associée aux installations téléphoniques modernes de Londres, du fait que le bureau téléphonique Nord a été établi dans un bâtiment de Barnsbury, jadis utilisé pour les réunions des Sandémaniens, communauté où FARADAY remplissait les fonctions d'ancien. Le fait qu'il y officia depuis 1862 jusqu'à sa mort en 1867, est rappelé par une plaque commémorative, érigée dans la salle, à la place même qu'il avait coutume d'occuper sur l'estrade. L'emplacement de son pupitre est indiqué par une dalle distincte, encastrée dans le sol. La plaque commémorative figure le lien qui rattache la téléphonie aux recherches de FARADAY, car elle représente son transformateur à anneau, flanqué, de chaque côté, d'une représentation du champ magnétique d'un récepteur téléphonique. Elle a été inaugurée par Lord KELVIN, en novembre 1906.

LA PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ

LA SUPRÉMATIE DE LA TURBINE A VAPEUR

Economie d'espace et de combustible

par Robert H. Parsons

Quand Charles Parsons construisit sa première turbine à vapeur, en 1884, il donna à l'industrie électrique la possibilité de prendre une extension dont, même aujourd'hui, il est impossible de prévoir la fin. Cette invention était aussi opportune que révolutionnaire. Cent cinquante ans s'étaient écoulés, depuis que Watt avait établi les principes fondamentaux de la machine à piston et, durant cette période, ce type de machines avait été graduellement perfectionné, si bien que son évolution ne pouvait plus guère progresser. Des considérations mécaniques limitaient à quelques milliers de chevaux-vapeur la puissance pouvant être donnée à ces machines. Leur rendement maximum était faible, comparé aux rendements modernes et leur vitesse maxima pratique de rotation était très inférieure à celles que demandaient les ingénieurs électriciens.

Quelque sentiment de regret que puisse nous inspirer la disparition des chefs-d'œuvre des anciens constructeurs, il faut reconnaître qu'ils avaient atteint le point culminant du type et, par suite, la limite du progrès possible dans cette direction particulière. L'application de la turbine à vapeur à l'industrie de la production électrique date de 1888, lorsque la Newcastle and District Electric Light Cy installa un turbo-alternateur d'une puissance de 75 kW. Ce fut le premier exemple de l'emploi d'une turbine à vapeur dans une centrale de service public et l'essai réussit si bien que 3 nouvelles unités d'une puissance de même ordre furent presque immédiatement commandées par la Compagnie.

Il était évident, pour les ingénieurs clairvoyants, qu'une ère nouvelle s'ouvrait dans la production de l'énergie, bien que même les plus hardis prophètes eussent pu difficilement prédire les développements extraordinaires qui allaient suivre. Quant aux critiques, elles

furent, bien entendu, nombreuses. Le nouveau moteur primaire, beaucoup d'ingénieurs peuvent s'en souvenir, était connu sous le nom sarcastique de « mangeur de vapeur » ; mais ce nom perdit toute justification, lorsque, en 1891, le Professeur Eving certifia que la consommation de vapeur d'une turbine Parsons de 100 kW fournie à la Cambridge Electric Light Company, ressortait à une valeur moindre que celle de toute machine à piston de même puissance, à la même époque. Cette démonstration de l'économie réalisée établit, d'une manière décisive et définitive, les avantages de la turbine pour l'exploitation des centrales. Les turbines avaient déjà gagné le match, en raison des économies évidentes qu'elles permettaient sur l'encombrement, sur les fondations, en raison aussi de la sécurité et de la simplicité de leur exploitation. Du moment qu'elle se révélait comme économique, la turbine à vapeur assurait sa place dans les stations centrales. Il fallut attendre, cependant, le commencement du présent siècle, pour que sa supériorité sur la machine à piston fut réellement établie. Les progrès de l'industrie électrique exigeant des unités productrices de plus en plus puissantes, la supériorité des turbines devint de moins en moins discutable. En fait, dès que l'on eut besoin d'unités de plus de 5 000 kW, la turbine resta maîtresse du terrain, les constructeurs de machines à piston ayant atteint la limite pratique de leurs possibilités.

A tout ingénieur familiarisé avec la pratique des stations centrales, il apparaît comme évident que, sans les turbines à vapeur, la fourniture d'énergie électrique, telle que nous la connaissons aujourd'hui, ne pourrait même pas exister. Le profane, qui envisage l'industrie au seul point de vue de son propre confort ou de ses commodités, sachant d'autre part que la fourniture d'électricité a précédé l'apparition de la turbine, pourrait, non sans raison, réclamer quelque justification d'une assertion aussi tranchante.

Cette justification s'imposera, cependant, si l'on se demande à quelle autre sorte de moteur primaire on pourrait songer pour satisfaire aux exigences de la situation.

La fourniture d'énergie électrique, au taux de consommation actuel dans les grandes agglomérations, implique l'existence de stations génératrices de plusieurs centaines de milliers de kilowatts de puissance.

La puissance des moteurs primaires devait augmenter proportionnellement, autrement la multiplication des machines et la complica-

tion de l'appareillage seraient devenues telles que l'exploitation et le contrôle auraient été rendus excessivement difficiles. De plus, l'emploi de grandes machines réduit à tel point l'intérêt du capital et les frais d'exploitation, que leur nécessité s'impose, du seul point de vue économique.

Il existe déjà, dans des stations centrales, plusieurs turbines à vapeur de plus de 150 000 kW ; il serait impossible de construire une machine à piston ou un moteur à combustion d'huile, approchant d'une telle puissance.

Le plus grand moteur à combustion construit jusqu'ici, pour une station centrale, n'a qu'une puissance de 10 000 kW.

Il est probable que cette puissance est beaucoup plus près de la limite pratique pour une machine à pistons quelconque, qu'une puissance 20 fois plus grande pour une turbine.

L'insignifiance de la concurrence que les moteurs à combustion interne peuvent faire aux turbines à vapeur dans l'industrie de la production électrique, paraît se dégager du fait que, pour l'ensemble de la Grande-Bretagne, l'ensemble de la production électrique par moteurs à gaz et à huile représente moins de 1 pour 100 de l'énergie totale fournie par les stations centrales publiques.

Pratiquement, la totalité de l'énergie est fournie par des stations à vapeur et, bien qu'il n'existe aucune statistique sûre donnant la proportion de l'énergie encore produite par les machines à pistons, l'observation journalière suffit à montrer que cette proportion, complètement négligeable, va en décroissant vis-à-vis de l'énergie produite par les turbines à vapeur.

Si le complet effacement des machines à pistons devant les turbines, dans les stations centrales, peut être surtout attribué à la limitation de leur puissance, il est un grand nombre d'autres considérations qui ont contribué, dans une forte mesure, au triomphe de la turbine. L'économie sur l'encombrement et par suite, sur les dépenses d'établissement n'est pas la moindre.

Nous en trouvons un exemple frappant dans l'histoire de la Centrale de Lotz Road, qui fournit le courant au chemin de fer souterrain de Londres. Le projet de cette station, établie en 1901, prévoyait 10 machines à pistons de 5 500 kW chacune, conformément à la pratique qui passait alors pour la meilleure. En raison, peut-être, des excellents résultats que venait de donner un groupe de turbines Parsons, de 1 000 kW, installé à la Centrale d'Elberfeld, les plans furent modifiés et l'on décida de substituer des turbines aux machines à pistons.

La Centrale a donc été exclusivement munie de turbines et il est intéressant de noter qu'à la fin de la présente année, elle contiendra en turbines 185 750 kW occupant exactement l'emplacement horizontal prévu d'abord en machines à pistons pour 55 000 kW.

La production, par mètre carré de surface de la salle des machines, a passé de moins de 18 kW à plus de 60 kW.

De plus, la vapeur correspondant au supplément de puissance a été produite sans que l'on ait eu à augmenter les dimensions de la chambre de chauffe. Ceci tient, en partie, au rendement plus élevé des turbines modernes et, en partie, aux perfectionnements apportés aux chaudières ainsi qu'à l'emploi d'une pression de vapeur plus élevée.

Un exemple plus impressionnant encore est donné par la Centrale de Willesden, de la London Power Company, qui renferme maintenant en turbines 125 750 kW dans la même salle de machines qui ne comprenait primitivement en machines à pistons que 13 500 kW, la production par mètre carré de surface ayant passé de 4,8 à 45,7 kW.

La Centrale de Bow, de la même compagnie, contenait d'abord huit machines à pistons produisant ensemble 16 000 kW.

Entre les quatre mêmes murs de la salle de machines, il y a maintenant six turbines, d'une puissance totale de 74 250 kW.

La puissance par mètre carré de surface a passé, par suite de la substitution des turbines à vapeur, de 7,8 kW à 36,3 kW et la consommation moyenne de vapeur par kilowatt-heure a été réduite de 12,5 à 5,3 kg.

La production de 18 kW par mètre carré de surface, obtenue à Lots-Road, peut, sans doute, être considérée comme le maximum pouvant être atteint dans une station centrale munie de machines à pistons.

Pour montrer l'avantage réel que présente la turbine, au point de vue de l'encombrement, nous pouvons rapprocher ce résultat de celui que l'on obtient lorsque l'économie de place constitue une nécessité impérieuse.

Cette condition se trouvait réalisée pour la station de Hellgate, à New-York, où l'on a pu installer convenablement 610 000 kW de turbines dans une salle mesurant 145 × 33 m, ce qui correspond à 157 kW par mètre carré, soit environ huit fois 1/2 le chiffre le plus élevé atteint avec les machines à pistons.

Production plus économique

En même temps qu'elle rendait possible la production d'une grande quantité d'énergie dans un bâtiment de dimensions modérées et sans exiger plus de machines qu'il n'était nécessaire pour la sécurité et la souplesse de l'exploitation, la turbine à vapeur a permis en même temps de réaliser une économie de charbon très marquée.

Non seulement elle est d'un rendement plus élevé que la machine à pistons mais encore, par le principe même de sa construction, elle permet d'utiliser la détente de la vapeur entre des limites de pression et de température beaucoup plus écartées.

Aujourd'hui, dans beaucoup de turbines, la vapeur est admise à la pression de 100 kg/cm^2 ; les températures de vapeur de 450° C et des vides de 725 mm et au-dessus, sont devenus très communs.

Par suite, tandis que les machines à pistons les meilleures et les plus puissantes ne pouvaient guère produire le kilowattheure avec moins de 10 kg de vapeur, une turbine fournit maintenant le même travail avec un peu moins de 4 kg de vapeur. En fait, une garantie de consommation de 3,8 kg de vapeur par kilowatt-heure a été récemment acceptée, avec pénalité, pour une grande turbine à réaction, travaillant dans des conditions très poussées. Ceci correspond à un rendement thermique total de 38,5 pour cent.

Ce chiffre démontre qu'une installation à vapeur peut être, au point de vue de la consommation de combustible, plus économique que le moteur à combustion même le plus puissant.

A des pressions et à des températures de vapeur de cet ordre et qui sont devenues d'un emploi général, le record du rendement est détenu par une turbine Parsons, construite pour la station centrale de Dunston. Cette turbine, décrite par C. D. Gibb, dans une récente communication à l'*Institution of Mechanical Engineers*, ne consomme que 9,280 unités B. T. U. par kilowatt-heure, ce qui correspond à un rendement thermique total de 36,8 pour cent.

Nous en avons assez dit, pour démontrer que, partout où elle doit consommer du charbon, l'industrie de la production d'énergie électrique ne peut, nécessairement, employer que la turbine à vapeur comme moteur primaire.

En fait, la turbine ne connaît pas de rivale. Elle est venue à l'existence au moment où les circonstances l'exigeaient et elle a fait face aux demandes toujours croissantes de l'industrie dès qu'elles étaient formulées.

Elle ne connaît d'ailleurs pour son développement, en aucun domaine, de limite ni de spécialisation. Le constructeur de turbines ne se préoccupe ni de la tension ni de la fréquence du courant à fournir; en sorte que les caractéristiques spéciales de la turbine n'imposent aucune restriction à l'industrie de la production. D'ailleurs, l'apparition de la turbine n'a entraîné la suppression d'aucune usine existante, elle s'est adaptée à toutes les conditions de travail de la vapeur, elle pourrait fonctionner en parallèle avec n'importe quel moteur primaire.

En permettant de réaliser des économies sur les frais d'installation, sur la consommation de charbon, sur les frais d'exploitation et l'entretien, elle a contribué, dans une large mesure, à réduire le prix du courant électrique et, ainsi, elle a donné à l'industrie un développement qui l'a rendue de plus en plus indispensable.

L'ÉVOLUTION DE L'ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

QUELQUES INSTALLATIONS PRIMITIVES

Les premières lampes de couleur

par le Colonel R. E. CROMPTON, C. B.

J'ai commencé à exploiter les conséquences de la découverte électro-magnétique de FARADAY à mon retour des Indes, neuf ans après sa mort.

Jusqu'à cette époque, je m'étais occupé de transports mécaniques pour les besoins militaires. En 1878, j'achetai quelques machines GRAMME qui étaient alors fabriquées, principalement pour l'éclairage des phares, par des maisons françaises.

La même année, dans mes ateliers de Chelmsford, je commençai à perfectionner les lampes à arc qui avaient été jusque-là construites en France, également pour le service des phares. Je reconnus bientôt que la dynamo GRAMME n'était pas du bon travail d'ingénieur. L'armature en anneau, montée sur noyaux de bois, ne tardait pas à prendre du jeu, et l'enroulement n'était pas non plus satisfaisant.

Au cours d'un voyage en Suisse, avec l'*Institution of Mechanical Engineers*, je fis la connaissance d'EMILE BURGIN, de Bâle, qui vit encore.

BURGIN était un habile mécanicien.

Nous convînmes que la machine de GRAMME avait besoin d'être modifiée et j'entrepris de construire ce que nous appelâmes la dynamo CROMPTON-BURGIN, que nous fûmes bientôt à même de livrer en grande série.

Pendant les quelques années de début, l'éclairage électrique était surtout fourni par lampes à arc, pour de grands espaces découverts, tels que les stations de chemins de fer ou les gares de marchandises. Mais quand SWAN nous eut donné la lampe à incandescence, les appli-

cations de l'éclairage électrique prirent immédiatement un accroissement énorme.

Lorsque nous commençâmes à travailler, en 1878, les données pratiques mises à la disposition de nous autres, ingénieurs, étaient des plus rares.

En effet, bien qu'en 1863 la *British Association* eût adopté le système C. G. S. d'unités électriques, ce n'est qu'à la conférence de Paris, à l'automne de 1881, que le nom de Volt fut donné à l'unité de force électro-motrice; celui d'Ohm à l'unité de résistance d'un circuit et celui d'Ampère à l'unité de quantité d'électricité.

Jusqu'à cette époque, les ingénieurs télégraphistes avaient toujours exprimé la résistance de leurs circuits en longueurs de fil télégraphique.

Notre notion de quantité, dont l'unité était alors appelée le Weber, était surtout liée aux dimensions des lampes à arc et évaluée suivant le diamètre du cratère des charbons positifs.

De très bonne heure, en utilisant nos machines Crompton-Burgin pour l'éclairage par arcs, nous reconnûmes que, bien que la tension et le courant engendrés augmentassent constamment avec la vitesse jusqu'à une certaine limite, l'augmentation du courant dans l'induit produisait, une fois cette limite dépassée, ce que nous appelions alors une magnétisation transversale, en sorte qu'une nouvelle augmentation de la vitesse diminuait la tension, la machine ayant une caractéristique plongeante.

Nous cherchâmes alors expérimentalement divers moyens d'exciter les aimants inducteurs et tout d'abord, avec des bobines en série sur le circuit principal : mais, après avoir essayé le procédé de Siemens qui montait les bobines d'excitation en dérivation sur le circuit principal, nous reconnûmes que la combinaison des deux procédés donnait une tension suffisamment constante aux bornes de la dynamo, pourvu que la vitesse fût suffisamment constante. Cette invention, que nous appelâmes l'enroulement compound, nous permit de fournir des dynamos pour de grandes installations, telles que celle du Palais de Justice, où la tension devait être maintenue constante, qu'il y eût 2 000 ou seulement 100 lampes allumées.

En sorte que tout ce que nos mécaniciens avaient à faire était de maintenir constante la vitesse de la machine.

Travaux de Glasgow

Une des difficultés contre lesquelles nous luttâmes avec succès, fut l'usure des collecteurs. Tandis que Gramme et Siemens avaient monté

les balais de contacts sur des bras séparés, ce qui rendait difficile de les placer tous deux à la position angulaire la plus favorable, nous les montâmes sur des bras fixés à une carcasse qui pouvait tourner sur un tourillon concentrique à l'axe de l'armature, en sorte que l'on pouvait régler les balais à volonté en faisant tourner la carcasse d'un petit angle.

Les premiers balais de GRAMME et de SIEMENS étaient de simples faisceaux de fils, mais nous leur substituâmes tout d'abord des empilages de minces plaques de cuivre.

Dans la suite, JOHN FORBES nous suggéra l'emploi du charbon et les balais ainsi constitués donnèrent d'excellents résultats.

En 1878, je fus assez heureux pour éveiller l'intérêt de Sir WILLIAM THOMSON, qui devint plus tard Lord KELVIN. Nous éclairions alors, par lampes à arc, la nouvelle station de Saint-Enoch à Glasgow ; Lord KELVIN, son frère JAMES THOMSON, et leur ami FLEMING JENKINS vinrent souvent suivre nos travaux et nous discutâmes alors la théorie complète permettant de calculer la tension produite par une dynamo qui tourne à une vitesse donnée.

Nous fûmes d'accord pour reconnaître que la formule ci-après pouvait être utile pour le calcul de nos dynamos :

$$\frac{4\pi \times \text{ampères-tours}}{2 \times \text{entrefer}}.$$

Ceci nous amena à étudier la meilleure méthode permettant d'accroître l'efficacité du champ magnétique en réduisant l'entrefer.

A cette époque primitive, nous donnions à tous nos électro-aimants inducteurs la forme de colonnes longues et minces sur lesquelles étaient enroulées les bobines d'excitation.

La machine « Jumbo », d'EDISON, en est un bon exemple ; mais j'arrivai personnellement à la conclusion que nous devions raccourcir et épaissir nos électros de champ et en même temps réduire l'entrefer, pour ne laisser sur l'armature que l'espace nécessaire à une seule couche d'enroulement.

GISBERT KAPP, qui était alors à mon bureau de dessin, n'était pas d'accord avec moi sur ce point mais, contrairement à ses désirs, je construisis une dynamo à électro-aimants très courts et très épais, à nombre réduit de tours sur les inducteurs et à une seule couche d'enroulement sur le noyau de l'armature.

Il se trouva que cette machine eut un grand succès ; la dynamo por-

tant mon nom était née et, l'année suivante, j'obtins la médaille de l'Exposition des Inventions.

La plus ancienne installation pour laquelle je reçus une commande définitive fut celle de Berechurch Hall, nouveau bâtiment élevé par Jesse Coope, un des associés de Ind, Coope et Cie de Romford. Ceci se passait au début de 1881. L'emploi de notre système d'enroulement compound, récemment inventé, nous permit d'obtenir sans difficultés une tension suffisamment constante aux bornes des lampes, en entraînant les dynamos par une machine à vapeur bien réglée. Mais, pour l'installation intérieure et les dispositions générales d'éclairage d'une maison de campagne, nous eûmes à créer et à livrer les équipements nécessaires, ainsi qu'à mettre au point les méthodes devenues aujourd'hui si familières à tous, qu'on les considère comme toutes naturelles.

Par exemple, la suspension des lampes au plafond par leurs propres conducteurs, les formes diverses des petits interrupteurs d'appartement, leur fixation près de la porte d'entrée, l'adaptation aux lampes électriques des appliques utilisées jusqu'alors pour l'éclairage au gaz, la pose des conducteurs sur les murs sans endommager la décoration, les abat-jour destinés à diffuser la lumière tout en protégeant les yeux contre les rayonnements directs, tous ces problèmes furent attaqués et résolus d'une façon satisfaisante par Harold Thomson, fils du grand R. William Thomson.

A cette époque, il n'y avait pas de monteurs électriciens, mais nous engageâmes quelques manœuvres adroits qui avaient été employés par l'entrepreneur comme poseurs de sonnettes et nous en fîmes bientôt d'excellents monteurs.

Avec l'aide de ces hommes, Thomson posa et fixa tous les fils d'installation intérieure de Berechurch Hall.

Les dispositions prises par Thomson étaient si satisfaisantes, que nous pûmes les adopter sans changements notables lorsque, vers la fin de 1881, Shaw Lefèvre, qui était alors premier Commissaire des travaux, nous commanda l'éclairage du nouveau Palais de Justice, nécessitant environ 2 000 lampes. Le fait que la pose des fils et l'installation générale du Palais de Justice n'a pas eu pratiquement à subir de retouches au cours des 50 années qui se sont écoulées depuis, est une preuve du génie dont fit preuve Harold Thomson, génie auquel, jusqu'à ce jour, il n'a pas été suffisamment rendu justice.

Vers cette époque, des commandes d'installations d'éclairage de maisons particulières, en ville ou à la campagne, nous arrivèrent en grand nombre.

La plupart du temps elles ne constituaient que des reproductions du plan général arrêté par nous à Berechurch.

L'intérêt montré par la Reine

Lorsque la reine Victoria désira faire installer la lumière électrique au palais de Buckingham et au château de Windsor, nous reconnûmes que, pour les palais royaux, nous devions faire mieux que pour les habitations privées.

Nous eûmes l'idée de dissimuler les sources lumineuses et d'éclairer les appartements par réflexion sur les plafonds blancs en dissimulant les lampes derrière les corniches.

La reine Victoria s'intéressa beaucoup à notre travail et discuta elle-même, avec nous, l'emplacement des lampes et l'intensité d'éclairement nécessaire dans les divers salons officiels.

W. H. Massey, qui est encore des nôtres, avait alors été engagé comme Ingénieur-Conseil pour donner ses avis à la Reine et il pourra, corroborant mes dires, attester que nous devons beaucoup au bon goût et au bon sens de la reine Victoria, quant aux dispositions définitivement adoptées ; celles-ci firent de l'éclairage des palais un grand succès et assurèrent une magnifique réclame à l'éclairage électrique en général, en même temps qu'à nous-mêmes.

Peu après la terrible perte de vies humaines que causa l'incendie du Ring Theater à Vienne, en 1883, nous commençâmes à substituer, dans les théâtres, la lumière électrique au gaz.

Feu l'empereur François-Joseph déclara alors que les dangers du gaz étaient si grands dans les théâtres, que l'électricité constituait le procédé d'éclairage le plus sûr et le meilleur.

L'Impérial Continental Gaz Company m'appela donc en consultation et, au cours des années suivantes, nous eûmes à exécuter le projet, puis la construction d'une station centrale devant alimenter l'ensemble des théâtres impériaux de Vienne.

Cette installation fut, en fait, la première qui ait assuré l'alimentation par une station centrale de grands bâtiments publics, dont quelques-uns étaient éloignés de près de 2 km.

Le Grand Opéra de Vienne fut le premier théâtre complètement éclairé à l'électricité. Toutes les lampes, sur la scène, dans la salle et dans les autres parties du bâtiment, étaient électriques.

Un notable progrès, qui fut vivement approuvé par l'Empereur, con-

sista à éclairer la salle par des appliques en saillie sur le devant des galeries, système appelé éclairage « Brustung ».

L'Empereur en fut extrêmement satisfait, car auparavant, quand on employait le gaz, il était impossible de placer là les becs, en raison des fumées et de l'air chaud qui s'en dégageaient et incommodaient le public des galeries supérieures.

Nous dépensâmes beaucoup de temps et d'efforts pour produire des effets de scène variés, en employant un grand nombre de circuits distincts de lampes colorées.

En faisant varier les résistances de chaque circuit, nous arrivâmes à augmenter graduellement la lumière, depuis l'obscurité complète de la nuit, en passant par les teintes rosées de l'aurore naissante, jusqu'à la pleine lumière du jour.

Les directeurs de l'Opéra furent si satisfaits de ces possibilités de mise en scène, qu'ils montèrent plusieurs opéras et ballets à seule fin de les essayer.

Ces spectacles étaient si populaires, que Tout-Vienne courait en foule à l'Opéra, surtout pour voir ce que les ingénieurs anglais avaient réalisé avec ce qu'on appelait alors le gaz électrique.

Les propriétaires des théâtres anglais, à commencer par Drury-Lane et le Savoy Theater récemment bâti, suivirent rapidement l'exemple que nous avions donné à Vienne et nous constatâmes que tous étaient enchantés de la suppression de la chaleur et des gaz brûlés, aussi bien derrière la scène que dans la salle.

Au Savoy, lorsque l'opéra de Gilbert et Sullivan, *Yolanthe*, fut monté pour la première fois, nous plaçâmes sur le front de toutes les fées des étoiles électriques et, comme chacune devait porter un accumulateur sur le dos, entre ses ailes, nous eûmes quelque difficulté à les convaincre qu'elles ne recevraient pas de secousses électriques.

LA DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ

L'ÉVOLUTION DES MÉTHODES,

par le Lieutenant-Colonel W. A. Vignoles, D. S. O.

Le tableau ci-après indique les dates des principaux événements qui ont jalonné l'histoire de la distribution et des emplois de l'électricité. On remarquera que 50 ans se sont écoulés entre la découverte de Faraday et le début de la première fourniture publique d'électricité :

1831	: découverte de Faraday.
1845	: dynamo à auto-excitation.
1858	: machine magnéto au phare de South-Foreland.
1876-78	: lampes à arc.
1879-81	: lampes à incandescence à filament de carbone.
1881	: première distribution publique d'électricité.
1882	: promulgation de la première loi sur l'éclairage électrique.
1888	: seconde loi sur l'éclairage électrique.
1890	: emploi de 10 000 V par « de Ferranti ».
1901-05	: formation des Compagnies de distribution.
1908	: lampes à filament métallique de tungstène.
1911	: emploi des grandes turbines à vapeur.
1913	: lampes à filament métallique à atmosphère gazeuse.
1919	: commission de l'électricité.
1926	: comité central d'électricité.
1930	: mise en exploitation du premier secteur de la « grille ».

Faraday construisit lui-même une machine qui devait engendrer de l'électricité et il fit aussi un moteur électrique ; mais ce n'étaient là que des appareils scientifiques et il restait beaucoup à faire pour les ingénieurs avant qu'ils puissent construire une machine pratiquement vendable.

Les machines de Faraday et celles de ses successeurs comportaient des aimants permanents (machines magnétos) et ce fut seulement en 1845 que Wheatstone construisit une machine utilisant un électro-

aimant ; le courant nécessaire, fourni d'abord par une batterie, le fut plus tard par la machine même ; en d'autres termes : la machine à auto-excitation était réalisée.

En même temps, le rendement des machines magnétos était porté à une valeur relativement élevée et, en 1858, l'une d'elles alimentait un arc puissant qui fournissait la lumière au phare de South-Foreland.

De 1860 à 1880, les efforts se portèrent sur le perfectionnement des génératrices électriques ou, comme on les appelait, des machines dynamos. Des hommes comme Pacinotti, en Italie, Gramme en France, Wheatstone en Angleterre et Siemens en Allemagne, contribuèrent à réaliser la machine industrielle.

Mais, tandis que ces progrès se poursuivaient, aucun besoin notable ne se faisait sentir d'une distribution publique de courant ; son principal emploi connu était l'éclairage à arc, or celui-ci n'était pas entré dans la phase industrielle.

Le monde devait attendre que Jablockhof eût, en 1876, réalisé ses bougies d'éclairage à arc, installées en 1878 sur les quais de la Tamise et que Brush eût présenté, deux ans plus tard, des lampes à arc travaillant en série, pour que l'électricité pût être employée industriellement à l'éclairage électrique.

L'éclairage à arc ne se prêtait certainement pas à l'éclairage intérieur, sauf peut-être dans de grandes salles.

Aussi, nombre de chercheurs s'attelèrent-ils à ce qu'ils appelaient le problème de la division de la lumière électrique.

Swan en Angleterre et Edison en Amérique l'étudiaient tous deux. A l'automne de 1878, Swan montra, à Newcastle, la première lampe électrique à incandescence et, en 1879, Edison prit son premier brevet anglais.

La lampe électrique se développa dès lors rapidement et l'on porta un vif intérêt aux moyens de fournir le courant d'une maison à l'autre.

En 1881, cinquante ans après la découverte de Faraday, se tint à Paris une exposition d'électricité qui attira l'attention des financiers sur les possibilités de l'éclairage électrique et, bientôt après, commença la fourniture publique du courant.

La même année, Godalming installa une distribution publique d'électricité par l'éclairage de ses rues. Au cours des deux années suivantes, un grand nombre de compagnies d'éclairage électrique se formèrent.

La loi sur l'éclairage électrique de 1882 opposa toutefois une barrière sérieuse à l'établissement des entreprises de distribution en Grande-Bretagne et ce ne fut qu'à partir d'une loi de 1888, amendant la précédente, qu'elles commencèrent à se généraliser dans le pays.

La Grande-Bretagne s'est ainsi attardée pendant six ans dans les premières étapes de la distribution électrique et c'est en grande partie aux ingénieurs anglais que nous devons de n'être pas restés désespérément en arrière.

Après 1888, les progrès furent très rapides et, vers 1900, un grand nombre d'entreprises s'étaient constituées. Dans ces lointaines années, les seules fournitures envisagées étaient celles d'éclairage : or, on ne tarda pas à constater que le prix de la production était considérablement grevé du fait que la forte demande de courant ne durait que quelques heures par jour.

Les ingénieurs cherchèrent donc dans quelles directions ils pourraient trouver d'autres débouchés ; vers 1900, de grands efforts furent faits en vue de développer les emplois de l'électricité comme énergie motrice et l'importance de l'éclairage commença à passer temporairement au second plan.

Les promoteurs des premières entreprises de production électrique n'envisageaient pas le transport du courant à une distance quelque peu importante. En fait, quelques-unes des compagnies de Londres établirent plusieurs Centrales sur leurs territoires respectifs pour réduire les pertes dans la transmission. Vers 1890 cependant, feu le Dr S. Z. de Ferranti étonna le monde en démontrant la possibilité de transmettre l'électricité à des distances relativement longues par l'emploi de hautes tensions (10 000 V) et, comme les difficultés techniques inhérentes à ces tensions furent rapidement surmontées, nous trouvons, entre 1901 et 1905, un grand nombre de compagnies « d'énergie » établies dans les différentes régions du pays et installées spécialement pour alimenter en courant de vastes territoires. La Grande-Bretagne était ici en tête du progrès.

Les compagnies d'électricité rencontrèrent à l'origine des difficultés considérables dues à ce qu'elles produisaient l'énergie au moyen de machines à vapeur dont la puissance était du même ordre que celles des grandes usines ou des ateliers auxquels elles auraient voulu fournir la force motrice ; par suite, elles constatèrent qu'il était difficile de lutter, au point de vue du prix de revient, contre des usines fonctionnant à charge presque constante. Elles pâtissaient aussi du fait que

la plupart des municipalités préféraient installer une petite usine indépendante pour alimenter leur territoire plutôt que d'acheter l'énergie à une compagnie étrangère.

Un grand nombre de petites centrales furent ainsi établies.

Feu Sir Charles Parsons avait étudié, pendant plusieurs années, le problème de la turbine à vapeur et, vers 1903, les turbines puissantes commencèrent à se répandre ; vers 1911 on construisait des unités de 25 000 kW.

Les progrès du rendement suivirent ceux de la puissance, entraînant une réduction rapide du poids de charbon consommé pour produire un kilowattheure.

L'adoption des turbines à vapeur commença à se généraliser vers 1910 ; depuis cette époque, le rendement moyen de la production a été en croissant régulièrement et il progresse encore.

Ainsi, en 1920-21, la consommation moyenne du charbon, dans l'ensemble du pays, était pour 1 kWh de 1,7 kg et, en 1929-30 de 950 g.

Ce progrès a permis aux Compagnies productrices et à toutes les entreprises de distribution de réduire leurs prix, spécialement pour les besoins d'énergie et ceci eut pour conséquence un rapide accroissement du nombre de kilowattheures vendus depuis la guerre. On peut le voir sur le graphique ci-contre, qui montre que le nombre d'unités vendues par an est maintenant le triple de ce qu'il était en 1919.

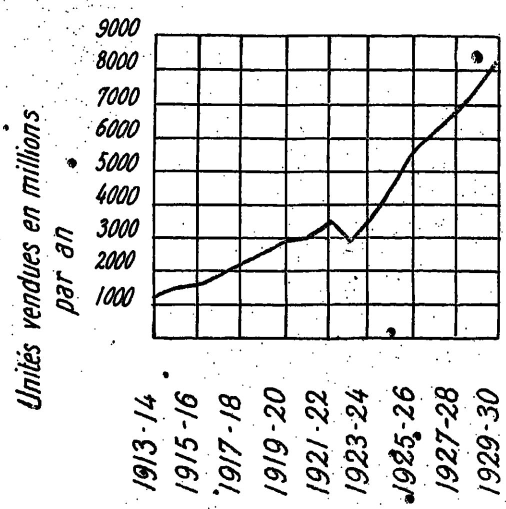
La distribution publique d'électricité reçut une vive impulsion du fait de l'introduction de la lampe à filament de tungstène, inventée en 1904 et qui, dans tout le pays, remplaça rapidement, vers 1908, la lampe à filament de carbone. Cette lampe, qui produisait la même quantité de lumière qu'une lampe à filament de charbon en absorbant moins d'un tiers du courant, inspira d'abord quelques craintes aux producteurs, mais nous pouvons constater maintenant que son invention marqua une nouvelle étape dans le développement de l'industrie de la distribution d'énergie.

En 1913, un filament de tungstène étiré fut enfermé dans une ampoule qui, une fois le vide fait, fut remplie d'un gaz inerte ; ce gaz soutire, par convection, la chaleur du filament, qui peut ainsi travailler à haute température en assurant une nouvelle et substantielle augmentation de rendement.

Jusqu'en 1914, la lampe à arc était largement employée pour l'éclairage des rues et des extérieurs mais, durant les années de guerre, la

plupart des appareils furent retirés du service et, lors du retour aux conditions normales, très peu d'arcs furent réinstallés ; la plupart avaient été remplacés par de fortes lampes électriques, du type à atmosphère gazeuse.

Pendant la guerre, la demande de courant pour l'énergie s'accrut fortement, surtout pour les fabriques de munitions. A la fin de la guerre, cette demande d'énergie diminua naturellement beaucoup ; pendant quelque temps, les entreprises virent diminuer leurs bénéfices, ce qui amena beaucoup d'entre elles à essayer d'accroître le chiffre d'affaires qu'elles faisaient avec le consommateur domestique,



en l'encourageant à employer l'électricité pour son chauffage et sa cuisine, aussi bien que pour son éclairage. Cette extension, prônée avec enthousiasme par quelques ingénieurs avant 1914, a rapidement progressé depuis 1920. Le nombre des abonnés privés employant maintenant l'électricité, est plus de trois fois supérieur à ce qu'il était à la fin de la guerre.

Un trait frappant de l'industrie de la fourniture d'électricité est que, malgré la crise économique intense de ces deux dernières années, la demande de courant, jusqu'au jour où nous écrivons, non seulement s'est maintenue, mais a augmenté.

Il est évident que le fort accroissement du nombre des consommateurs domestiques et la plus grande variété d'emplois du courant électrique donneront plus de stabilité aux entreprises et atténueront considérablement les conséquences de la dépression commerciale.

Cet accroissement du chiffre d'affaires a, bien entendu, entraîné une augmentation continuelle des capitaux investis ; le montant total des capitaux immobilisés par l'ensemble des municipalités et des compagnies atteignait, en 1897, dix millions de livres ; en 1910, quatre-vingt-dix millions ; en 1919, environ cent vingt-quatre millions ; à la fin de 1930, trois cent vingt-sept millions et cette immobilisation continue, à raison d'environ trente millions de livres par an. Comme le revenu de presque tous ces capitaux est substantiel, on peut constater que l'industrie électrique apporte une contribution importante à l'emploi de la main-d'œuvre et au maintien de la vie économique du pays.

En 1919 et 1926, deux lois sur la distribution de l'électricité ont été votées et ont institué la *Commission* et le *Comité Central d'Electricité*. Ils ont été chargés de coordonner la production du courant dans toute la Grande-Bretagne et d'établir ce que l'on a appelé la « grille », réseau de lignes de transport à haute tension décrit dans un des articles ci-joints.

L'ÉVOLUTION DE LA DYNAMO

LES MACHINES POLYPHASÉES MODERNES

par Miles Walker

L'un des premiers inventeurs qui ait construit une dynamo pratique basée sur les découvertes de Faraday fut Pixii qui, en 1831, fit tourner un aimant permanent au-dessous de deux bobines fixes dans lesquelles il engendrait ainsi un courant alternatif.

En 1832, il fit une seconde machine pourvue d'un collecteur qui redressait le courant alternatif.

L'aimant, en fer à cheval, était monté sur un axe vertical de manière que ses pôles passent successivement sous deux bobines de fil fixées à la partie supérieure du bâti. Le collecteur, placé à la partie inférieure de l'axe, donnait, dans le circuit extérieur, un courant de direction unique. Ce dispositif avait été suggéré par Ampère.

La bobine de la dynamo de Pixii était fixe ; chacune des deux parties métalliques du collecteur comprenait une bague continue en contact avec un balai fixe et recueillait le courant alternatif produit dans la bobine. Les deux segments fendus du collecteur faisaient passer, dans deux autres balais fixes, le courant de direction unique.

Dans notre pays, Saxton en 1833 et Clarke, en 1835, construisirent des dynamos dans lesquelles les aimants étaient fixes et les bobines mobiles.

La machine de Clarke avait un seul collecteur, dont chacun des segments était relié directement aux extrémités du fil des bobines.

Dans les premières dynamos, l'aimant inducteur était en acier à aimantation permanente. En 1838, Page employa un électro-aimant qui avait été construit par Sturgeon plusieurs années auparavant.

Au début, l'électro-aimant était excité par une source indépendante, batterie ou petite magnéto mais, en 1848, Jacob Brett fit passer le courant de l'induit dans une bobine de fil entourant l'aimant permanent de façon à en accroître la force. Telle fut l'origine de la dynamo à auto-excitation ; aujourd'hui, la plupart des dynamos à courant

continu excitent leurs propres inducteurs, mais les alternateurs, ne pouvant le faire, doivent être munis de petites dynamos à courant continu appelées excitatrices.

Les premières armatures étaient formées de noyaux de fer compacts sur lesquels on enroulait les bobines. On ne remarqua pas tout d'abord que des courants de FOUCAULT, se développant dans ces noyaux, y déterminaient une perte et un échauffement considérables.

En 1847, PULVERMACHER proposa de construire le noyau de l'induit en tôles de fer minces, dans lesquelles ne pouvaient circuler que des courants de FOUCAULT très faibles. Ce perfectionnement faisait franchir un pas important vers la construction d'une dynamo à haut rendement. Longtemps avant que les aimants inducteurs fussent autoexcités, des essais heureux avaient été faits pour engendrer des courants très puissants au moyen d'induits constitués de plusieurs bobines tournant entre les pôles de grands aimants permanents.

Dans une machine établie par NOLLET, 8 rangées d'aimants permanents, fixées sur une charpente massive de fonte, projetaient leurs pôles radialement vers l'intérieur. L'induit consistait en un certain nombre de disques de laiton, sur chacun desquels étaient montées 16 bobines tournant entre les pôles de l'inducteur. Au début, ces bobines étaient connectées à un collecteur à 32 lames, sur lequel frottaient des balais recueillant un courant redressé.

Ce collecteur fut toutefois abandonné, en raison des étincelles qui s'y produisaient et les bobines furent reliées à des bagues glissantes, de manière à donner un courant alternatif d'environ 6 400 alternances à la minute. A cette fréquence, le courant alternatif se prêtait à l'alimentation d'une lampe à arc. Beaucoup de machines, à peu près identiques, furent construites par HOLMES en Angleterre et employées pour l'éclairage à arcs des phares. L'induit enroulé en tambour de W. von SIEMENS, de 1857, placé directement entre les pôles de l'aimant inducteur, constituait un grand progrès sur ce qui avait été fait jusqu'alors. Sous sa forme la plus simple, il consistait en une pièce de fer allongée, présentant une section transversale qui rappelait la lettre H et découpée dans un cylindre ; elle tournait entre des pièces polaires alésées de manière à ne laisser qu'un faible espace libre. Dans les rainures de ce noyau en forme de navette, la bobine d'induit était enroulée longitudinalement et ses deux extrémités étaient fixées aux segments d'un collecteur en deux pièces. Sur cette armature, on pouvait concentrer la plus grande partie du flux ma-

gnétique issu d'un puissant électro-aimant, en sorte que la machine avait un débit considérable pour ses dimensions.

Henry Wilde construisit avec succès des dynamos munies de l'induit Siemens et, en 1866, il en exposa une très puissante à la *Royal Society*. Les électro-aimants de l'une de ses machines étaient excités au moyen d'une petite génératrice magnéto électrique. Ces essais de Wilde marquèrent le début des grandes dynamos.

Un grand progrès dans la construction des dynamos à courant continu, fut l'invention de l'induit en anneau, dit induit Gramme. Autant qu'on peut le savoir, l'italien Pacinotti fut le premier à réaliser le véritable induit en anneau, mais c'est le français Gramme, qui donna à l'invention son expansion commerciale. L'induit de Pacinotti différait des précédents en ce que les bobines y étaient enroulées sur un anneau de fer et connectées entre elles de manière à former un circuit fermé, indépendant de toute connexion au collecteur. Des fils de dérivation étaient branchés entre les points de jonction des bobines et les lames d'un collecteur, en sorte que le courant pénétrait par une lame pour sortir par celle diamétralement opposée, en traversant les deux moitiés de l'enroulement et en excitant des pôles magnétiques aux deux côtés opposés de l'anneau de fer. Ceci différait essentiellement des bobines enroulées sur les parties saillantes d'une armature et excitant chacune un pôle magnétique distinct. Quand un tel induit tourne entre les pôles d'un aimant, les forces électro-motrices de toutes les bobines montées en série s'additionnent et le courant dans chaque bobine peut s'inverser indépendamment lors de son passage sous le balai ; ceci rend la commutation facile, bien que le nombre de tours total soit suffisant pour engendrer une force électro-motrice élevée. Tel est le secret du succès de l'enroulement Gramme.

L'introduction de la lampe à incandescence par Edison et Swan provoqua une grande demande de dynamos et, au cours des années qui suivirent 1880, les Centrales d'éclairage de villes commencèrent à s'installer en nombre croissant. Quoique les travaux de Siemens, de Gramme et d'autres, eussent fait beaucoup pour mettre dans le commerce la dynamo à courant continu, sa construction n'était pas convenablement comprise.

Ce furent John et Edward Hopkinson, de Manchester qui, pour la première fois, apprirent aux ingénieurs à traiter scientifiquement les données utilisées dans une dynamo. En 1886, ils leur montrèrent com-

ment on pouvait calculer le flux magnétique total dans un circuit magnétique donné et prédéterminer le fonctionnement d'une machine d'après ses dimensions. Des contributions notables à cette théorie, furent apportées par KELVIN, KAPP et ARNOLD, entre autres. Au début, la dynamo à courant continu était la machine favorite des ingénieurs électriciens, car ils comprenaient les lois relatives au courant continu parcourant un circuit, tandis que les propriétés du courant alternatif leur paraissaient beaucoup plus compliquées. Toutefois, comme il devint nécessaire de transporter l'énergie électrique à des distances considérables des stations centrales, on reconnut qu'il convenait d'employer des tensions très supérieures à celles de 100 ou 200 V requises pour les lampes. Avec le courant alternatif, il est possible d'élever ou d'abaisser la tension au moyen d'un transformateur très simple, ne comportant aucune pièce mobile. Ce transformateur n'est autre, en principe, que le simple anneau de fer muni de deux bobines, fabriqué par FARADAY.

Si l'on doit transmettre une puissance de 1 000 W à 2 km, il est plus économique de transmettre 1 A sous 1 000 V que 10 A sous 100 V. Le conducteur n'a pas besoin d'être si gros et la perte d'énergie n'est pas aussi grande ; mais la tension de 1 000 V est dangereuse pour l'homme et elle est trop élevée pour être convenablement employée dans les lampes électriques.

Nous avons donc besoin de quelque appareil approprié pour abaisser la tension. Pour pouvoir faire usage du transformateur, il était nécessaire de disposer de courant alternatif, en sorte que les alternateurs recommencèrent à être largement utilisés vers 1890 et le transport en courant alternatif se généralisa.

Mais à cette époque, il n'existait pas de moteur pouvant fonctionner d'une manière satisfaisante sur les distributions à courant alternatif. Il est vrai, comme JOHN HOPKINSON nous le montra, qu'un alternateur fonctionne comme un moteur synchrone ; mais il ne peut démarrer de lui-même et il ne se prête pas, en général, au travail demandé aux moteurs. C'était un grand inconvénient pour le transport des courants alternatifs et les ingénieurs du courant continu triomphaient du fait de la supériorité de leurs moteurs.

Ce fut alors que se produisit la grande invention des machines polyphasées, grâce auxquelles la difficulté inhérente au moteur à courant alternatif fut complètement surmontée.

FERRARIS montra, en 1888 que, lorsque deux courants alternatifs, de

phases différentes, à la manière des manivelles d'une locomotive, traversent deux bobines disposées à angle droit, ils produisent un champ magnétique tournant, qui détermine la rotation de masses de métal compactes sans connexion avec le circuit.

Si, au lieu d'une simple masse de métal, nous employons un rotor convenablement établi et formé d'un cylindre de tôles de fer portant des conducteurs à sa surface extérieure et si nous le plaçons dans un champ magnétique tournant, nous aurons réalisé un moteur qui pourra fournir des milliers de chevaux bien que son rotor n'ait aucune connexion électrique avec le circuit extérieur.

L'énergie lui est transmise par l'intermédiaire du champ magnétique tournant produit par le stator qui l'entoure et qu'alimentent des courants polyphasés. C'est un exemple, notablement plus compliqué, de l'induction magnéto-électrique de Faraday.

Nicolas Tesla, Dobrovolsky, C. E. L. Brown et d'autres encore dépensèrent beaucoup d'efforts, vers la fin du xix° siècle, pour donner au moteur polyphasé une forme pratique. Il fut démontré que les courants triphasés (de phases différentes comme sont les impulsions dans une machine à trois cylindres) étaient supérieurs aux courants à deux phases ; ceux-ci exigent pour leur transport trois conducteurs, mais la transmission triphasée présente une telle économie sur la transmission monophasée, que son emploi est devenu presque universel.

LA GRILLE NATIONALE

EXPLOITATION ET CONTROLE

La Recherche des défauts

par P. V. HUNTER

Lorsqu'on pense à la Grille nationale, l'attention est attirée, trop fortement peut-être, sur le réseau à 132 000 V en sous-estimant les réseaux secondaires à 30 000, à 11 000 et 400 V. Ces réseaux à tension inférieure doivent cependant, à mesure que la fourniture de l'énergie électrique se développera, prendre une importance croissante et finalement dépasser, par le capital investi et l'ampleur des opérations, le réseau à 132 000 V lui-même. Les lignes de transport fonctionnant à 132 000 V ne présentent pas, par elles-mêmes, de caractéristique technique bien nouvelle. Cette tension a été employée à l'étranger, depuis un grand nombre d'années, sur des lignes de construction semblable à celle de la Grille ; des conducteurs en aluminium, à âme d'acier, y sont suspendus, par des isolateurs, à des pylônes en cornières d'acier boulonnées. En fait, la seule particularité digne d'être notée est qu'ici l'installation est calculée pour que les conducteurs puissent supporter une épaisseur radiale de 12 mm de glace, ce qui correspond à un facteur de sécurité mécanique anormalement élevé. Il est vrai aussi que, par endroits, il a fallu employer des pylônes plus élevés qu'à l'ordinaire, pour la traversée d'estuaires navigables.

Le caractère qui différencie, des réseaux analogues posés ailleurs, la Grille à 132 000 V de Grande-Bretagne, est plus particulièrement son étendue et sa complexité. En effet, 5 000 km environ de circuits triphasés constituent un réseau compliqué ; la densité des lignes posées par unité de surface du territoire desservi est très élevée, si on la compare à celle des réseaux analogues existant partout ailleurs. Ce sont ces caractères d'étendue, de densité et de complexité, qui font de la Grille un problème technique de première importance, car ils concourent tous pour imposer la protection sélective automatique et le

contrôle complet du réglage de la charge et du fonctionnement des interrupteurs, si l'on veut assurer la fourniture dans des conditions satisfaisantes.

Installation des sous-stations

Les ingénieurs chargés d'établir la Grille ont divisé le réseau en un certain nombre de grands secteurs, possédant chacun un centre de contrôle, auquel parviennent automatiquement les informations les plus complètes sur les conditions d'exploitation et cela dans une mesure qui n'avait jamais été atteinte auparavant ; l'ingénieur de service a constamment devant les yeux toutes les modifications survenues dans la charge et toutes les dispositions prises sur le réseau. quelques secondes après leur réalisation. Ce service d'information s'ajoute intégralement aux dispositifs de protection, qui isolent automatiquement tout « feeder » ou tout transformateur sur lequel se produit un défaut. En plus de tout cela, il existe entre les centres d'exploitation un réseau complet de communications téléphoniques.

Les progrès faits dans l'installation des sous-stations se portent, de plus en plus, vers la réalisation du type extérieur, de préférence du type bas, plutôt que du type en hauteur, en raison de son meilleur aspect et de la plus grande accessibilité des appareils pour la surveillance et l'entretien.

Un nouveau pas a été accompli à Londres par l'adoption de disjoncteurs du type extérieur cuirassé dans les sous-stations à 66 000 V alimentées par câbles souterrains.

En ce qui concerne l'équipement des sous-stations, les disjoncteurs à huile constituent l'élément sur lequel se porte plus particulièrement l'attention des ingénieurs. La concentration de la distribution électrique en un seul réseau, impose évidemment des conditions plus sévères pour les disjoncteurs qui doivent couper un circuit en cas d'accident. L'importance de plus en plus grande de cette fonction est aggravée par le manque de toute connaissance précise sur la limite actuelle de la capacité de rupture des disjoncteurs de circuits individuels.

Nous devons nous féliciter de ce que l'on puisse maintenant se procurer chez nous des installations d'essai capables de produire des courts-circuits de 1 500 000 kVA. Les renseignements qu'elles nous fourniront, conduiront sans nul doute à des progrès beaucoup plus

rapides que dans le passé; il était en effet nécessaire de nous reporter aux accidents survenus en service, pour nous procurer les données permettant de nouveaux perfectionnements techniques.

Les sous-stations contiennent, parfois, des transformateurs de dimensions hors de l'ordinaire.

Dans les réseaux secondaires à 33 000 V, la tendance du *Comité Central* est d'employer des pylônes en cornières, dans bien des cas où les entrepreneurs utilisaient d'ordinaire, dans le passé, des poteaux en bois créosoté.

On tente aussi et avec succès, de remplacer le poteau en bois par une construction en cornière de forme plus esthétique sur les lignes à basse tension, dans les rues de village et de petite ville.

Dans tout le réseau national, la tendance a sans aucun doute été, et elle persiste jusqu'à présent, à employer des lignes aériennes partout où cela est possible et de réserver les câbles souterrains, en raison de leur prix plus élevé, aux seuls cas où ils ne peuvent être évités. A cet égard, les fabricants de câbles ont, sans aucun doute, quelque retard à regagner. La réalisation d'un câble à haute tension à bon marché ne présenterait pas de difficultés sérieuses, si l'on s'attaquait résolument au problème ; la constitution d'une organisation commune de recherches, qui a été établie entre les principaux fabricants de câbles, est de nature à accélérer beaucoup les progrès en cette matière.

Emploi des câbles

Le câble rempli d'huile, que l'on essaye dans certains cas, n'a reçu jusqu'ici que des applications limitées, en raison des difficultés et du prix d'installation de l'équipement accessoire, surtout dans les régions à dénivellations nombreuses. Les réseaux secondaires exploités à des tensions basses, pour lesquelles les câbles sont couramment employés, présentent aussi un problème qui n'a pas été convenablement étudié. Ces réseaux seront principalement installés dans les districts ruraux, tandis que la pratique des câbles doit, dans une grande mesure, être adaptée aux conditions rencontrées dans les villes, où le prix de la tranchée et de la réfection constitue indubitablement une forte part du prix total et où les câbles doivent être soigneusement protégés contre les dommages accidentels causés par d'autres travailleurs.

D'une manière générale, la technique des câbles devra certainement s'adapter aux conditions rurales et, là où on y est arrivé, on a constaté que leur service meilleur, la meilleure répartition qu'ils assurent de

la tension, leur plus longue durée de vie, leurs moindres frais d'entretien, compensent l'importance de leurs frais d'installation par rapport aux lignes aériennes, pourvu que l'excès de ces frais ne dépasse pas 50 pour cent.

La plus grande partie des réseaux de distribution reste à construire et il faut espérer que des efforts seront faits pour assurer l'emploi des câbles partout où les conditions du terrain le favoriseront.

MANIPULATIONS CHIMIQUES

LA DÉCOUVERTE DU BENZOL PAR FARADAY

L'Amélioration des verres d'optique

par Sir Robert ROBERTSON, F. R. S.

Nous sommes habitués à rencontrer, dans les travaux théoriques et pratiques de FARADAY sur la chimie, des anticipations si frappantes, que leur étude tend à nous inspirer quelque prudence quand nous sommes tentés de lui attribuer des progrès qu'il ne prévoyait pas et, à la lueur de nos connaissances actuelles, des relations qui n'ont été établies que par ses successeurs.

Néanmoins, cette étude nous laisse pleins d'admiration, non seulement quand nous considérons la vigueur avec laquelle il s'attaquait au problème à résoudre, mais aussi, quand nous suivons les pas, qui nous paraissent comme inéluctables, accomplis vers sa solution.

D'autres articles de cette publication exposent le rôle fondamental joué, dans les théories modernes, par ses travaux sur les équivalents électrochimiques, ainsi que leur rapport avec les constituants positif et négatif de la molécule, tels que nous le connaissons aujourd'hui ; ils rappellent aussi la liquéfaction des gaz qui a abouti aux procédés modernes de réfrigération et à la préparation des gaz rares, qui sont aussi importants pour la science que pour l'industrie, et encore la production des alliages d'acier.

Dans le présent article, nous considérerons quelques autres travaux chimiques de FARADAY. Sa technique expérimentale est décrite, avec les plus minutieux détails, dans un volume in octavo de plus de 600 pages, intitulé « Chemical manipulation ». C'est un traité sur les méthodes chimiques qu'il a toutes employées et, souvent, imaginées lui-même ; ce livre pourrait être étudié avec profit par ceux qui aujourd'hui s'initient à cette science ; car bien qu'il ait été gêné, faute de disposer des commodités de nos laboratoires modernes, telles que le brûleur Bunsen, les condenseurs de Liebig, les longs tubes de caout-

chouc, les pipettes de lavage, les robinets de verre, etc... on trouve dans son travail l'origine de nombreuses pratiques modernes et il évoque le temps où le chimiste devait être aussi un artisan.

Les sources de matières colorantes

La manière dont il appliquait ces méthodes d'artisan est exposée dans ses « Researches in Chemistry and Physics ». Nous en tirerons un exemple : celui de la découverte du benzol, en 1825.

Par distillation fractionnée, comme nous dirions maintenant, d'une huile tirée du « gaz d'huile », il obtenait un liquide dont la pureté était démontrée par la constance de ses points d'ébullition et de fusion et de ses autres propriétés physiques.

Dès lors, en partant des résultats quantitatifs d'une série d'opérations : évaporation, combustion de la vapeur, absorption des produits, il trouva, par un procédé qui force notre admiration, l'exacte densité de vapeur et la composition du corps. Celui-ci était le bicarbure d'hydrogène, ou benzol, comme nous l'appelons maintenant, substance appartenant à la même famille que des centaines de milliers de substances organiques connues, y compris les matières colorantes ou pharmaceutiques et les développateurs photographiques. Exactement de même que, 4 ans plus tôt, il avait obtenu la combinaison de l'éthylène et du chlore et isolé plusieurs composés nouveaux issus de cette réaction, son sens chimique le conduisit aussi à attaquer l'hydrocarbure nouvellement découvert par le chlore et d'autres réactifs. Il fit ainsi connaître les réactions chimiques du benzol, comme, une année plus tard, il démontra que le naphtol pouvait se combiner à l'acide sulfurique ; si donc nous ne pouvons revendiquer pour Faraday la découverte des matières colorantes, du moins pouvons-nous dire qu'un premier pas fut fait, lorsqu'il montra que ces deux hydrocarbures, d'où dérivent tant de ces matières, réagissent sous l'attaque de réactifs appropriés.

Non seulement il mit en évidence les propriétés chimiques de ces corps, mais il montra comment on peut faire réagir certains d'entre eux sous l'action de la lumière.

Dans sa « Chemical manipulation », tout en recommandant un bon éclairage général du laboratoire, il conseille de disposer d'un emplacement directement exposé au soleil, « car, dit-il, nous avons reconnu que les rayons solaires ont une forte influence sur les transformations chimiques ».

Il en fournit un exemple frappant quand il constate le peu d'action entre la vapeur de benzol et le chlore, tant qu'il n'expose pas le mélange à la lumière solaire : ce type de réaction constitue la base même de la photo-chimie.

Isomérisme.

Au cours de ses recherches sur le gaz d'huile, il isola, outre le benzol, un autre hydrocarbure, dont il vérifia exactement les propriétés physiques et la composition. C'était, en réalité, du butylène ; il conclut, de la nature de ses composés chlorés, que ce corps lui fournit l'exemple d'une substance dans laquelle les éléments, carbone et hydrogène existent dans la même proportion que dans le gaz oléfiant (éthylène), mais sont dans un état de combinaison tout différent.

Faraday établit ainsi cette vérité nouvelle : des corps de même composition centésimale peuvent avoir des propriétés différentes ; c'est le phénomène de l'isomérisme, qui ne tarda pas à jouer un rôle important dans les théories chimiques, en particulier quand, en 1888, Wöhler montra, tout à fait indépendamment, que le cyanate d'ammonium peut être transformé en urée, qui avec la même composition, possède des propriétés chimiques entièrement différentes.

Liquides colorés.

Dans le but précis d'améliorer certaines matières, il entreprit deux séries de recherches, l'une, déjà signalée, sur l'acier, en vue d'obtenir des instruments doués de plus de mordant et un métal moins sujet à la corrosion ; l'autre sur les verres d'optique. Cette dernière, commencée à l'instigation de la *Royal Society*, fut très longue.

Elle impliquait la construction, à la *Royal Institution*, de fours de fusion et de recuit, le choix des matières premières et de leurs proportions ; elle impliquait aussi l'étude des propriétés, optiques et autres, des verres produits.

Le résultat pratique fut l'amélioration des objectifs de microscope ; de plus, un des spécimens du verre lourd de Faraday entra dans l'histoire, le jour où il l'employa, simultanément avec son électro-aimant, pour démontrer la rotation de la lumière polarisée dans un champ magnétique. Cette découverte éclaira d'une vive lueur sa conception de l'unité et de la convertibilité réciproque du magnétisme, de l'électricité, de la lumière, des forces chimiques et gravitationnelles bien que, pour ces dernières, il n'ait pu trouver la preuve qu'il cherchait.

La chimie et la physique de la matière à l'état de division extrême ont donné naissance à une littérature abondante depuis que Graham a décrit, en 1861, l'état colloïdal, qu'il distinguait de l'état cristalloïdal de la matière. Cette distinction a perdu quelque peu de sa précision depuis que la lueur pénétrante des rayons X nous a renseignés sur la structure de la matière, mais Faraday, dans sa conférence bakérienne de 1857, était amené à dire qu'un liquide, que nous appellerions aujourd'hui une « solution d'or colloïdal », contient ce métal à un état de division extrêmement fine. Les couleurs du verre rubis, dont l'or est un des constituants et des liqueurs bleues, rubis et jaunes, dans lesquelles les solutions d'or ont été réduites par des réactifs, fascinaient Faraday ; les recherches qu'il entreprit sur cette question, furent un de ses derniers travaux.

Il existe aujourd'hui, à la *Royal Institution*, des flacons renfermant ces liquides rubis ainsi que des pellicules sur verre, résidus de leur évaporation, qu'il employait dans ses recherches. La manière dont se comportent ces liquides colorés, quand on les examine par réflexion et par transparence, ou qu'on les attaque chimiquement, puis qu'on les filtre, conduisit Faraday à conclure que ce n'étaient pas des solutions d'or, mais qu'ils contenaient en suspension des particules d'or de très petites dimensions.

Cette déduction est entièrement confirmée par les rayons X, qui montrent que les particules sont de l'or métallique.

De même, il conclut que le verre rubis devait sa couleur aux particules d'or solide, disséminées dans sa masse. La petitesse de ces particules résulte de son estimation, d'après laquelle il y a 1 volume d'or dans 750 000 volumes du fluide rubis ; cette valeur s'accorde avec les évaluations de la grandeur des particules, obtenues ultérieurement à l'ultra-microscope.

La question de savoir par quoi peut être combattue la tendance de ces particules, finement divisées, à se coaguler avec des particules plus grandes, a joué un rôle important dans la chimie des colloïdes. Ici encore, Faraday a reconnu que la couleur rubis est stabilisée par l'addition d'une gelée et, beaucoup plus tard, Zsigmondy, en observant le temps qui s'écoule jusqu'à la coagulation d'une solution colorée d'or, par addition de gélatine, de gommes et d'acide silicique, a évalué l'action protectrice de ces substances.

L'influence de substances étrangères, appelées « catalyseurs », qui déclenche des actions chimiques entre les principaux réactifs, a toujours éveillé un intérêt particulier chez les chimistes, depuis que

Davy et Döbereiner ont découvert que le platine spongieux détermine à froid la combinaison de l'oxygène avec l'hydrogène et avec certaines vapeurs combustibles ; Berzelius avait admis, sans nécessité, l'existence d'une force catalytique.

Grâce aux catalyseurs, les températures auxquelles les réactions se produisent peuvent être fortement abaissées et des corps de constitution très complexe peuvent se former à température modérée, au sein des liquides organiques, dans les animaux et les plantes.

Chimie et Industrie.

A titre de sous-produit, en quelque sorte, de ses travaux sur les équivalents électrochimiques, pour lesquels il employait comme indicateur un voltamètre à électrodes de platine, Faraday rechercha la cause des pertes en oxygène et en hydrogène produits et recueillis dans cet appareil ; il arriva à la conclusion qu'elles sont dues à l'action des pôles de platine sur les gaz ; une étude ultérieure des substances qui s'opposent à la combinaison, lui démontra la nécessité d'une propreté parfaite de la surface du platine. Il reconnut, en outre, que la combinaison se produit sur cette surface propre et qu'elle est due à « une attraction d'agrégation et d'affinité chimique, le rayon d'action des particules s'étendant au delà des autres particules qui leur sont immédiatement et évidemment unies ».

C'est l'hypothèse de l'adsorption superficielle à laquelle, dans sa forme moderne, on a ajouté la conception de l'orientation des particules ; elle diffère de celle basée sur la nécessité d'un composé intermédiaire et proposée par les Armstrong ; mais on peut les accorder en supposant l'existence d'une force directrice dépendant de quelque liaison chimique entre la surface catalytique et les corps réagissants. Les formes que revêt ce genre de réactions chimiques sont nombreuses et variées. Les réactions catalytiques jouent un rôle de première importance pour déterminer des réactions, non seulement dans les mélanges gazeux, mais aussi dans les processus vitaux, où interviennent les enzymes.

Beaucoup d'importants procédés industriels dépendent de la catalyse ; par exemple, la fabrication de l'acide sulfurique, en partant de l'acide sulfureux et de l'oxygène en présence du platine et, récemment, celle des composés du vanadium ; celle de l'acide nitrique, en partant de l'ammoniac et de l'air en présence du platine ; celle de l'ammoniac lui-même en partant de l'azote et de l'hydrogène en présence de l'oxyde de fer ; le durcissement des huiles par hydrogénation, en présence du nickel finement divisé comme catalyseur.

Nous avons pu ainsi nous faire quelque idée du génie pénétrant de Faraday dans le domaine chimique. Son travail sur l'équivalence électrochimique est, bien entendu, fondamental ; il constitue la base des théories modernes et le fondement des grandes industries électrochimiques. Dans des questions comme celles du verre et de l'acier, dont l'amélioration était l'objet précis de ses recherches, ses travaux peuvent être considérés comme étant en avance sur son temps, tout au moins en ce qui concerne l'acier. Ses autres découvertes en chimie ont ouvert à l'industrie des domaines aussi étendus que divers. Ainsi, les réactions chimiques du benzol et du naphtol constituent, pour une grande part, cette branche importante de la chimie organique qui est celle des composés aromatiques.

La brillante lumière du soleil est employée pour produire des effets photo-électriques.

L'existence des corps isomères est démontrée par l'identité de composition, mais non de constitution, de ses composés du carbone.

On lui doit une explication de l'action catalytique du platine qui détermine des combinaisons chimiques, sujet qui a donné lieu à beaucoup de théories et dont le principe forme la base de nombre de grandes industries.

La matière et ses propriétés à l'état d'extrême division, comme dans ses solutions d'or, font l'objet d'une branche de la chimie d'importance croissante, connue sous le nom de chimie des colloïdes.

Ainsi, sans trop nous reporter au passé et en attribuant, aux origines, un avenir prophétique, nous trouvons dans les travaux de Faraday les germes d'une grande partie de la science chimique d'aujourd'hui.

LA MAGNÉTO-OPTIQUE

LA POLARISATION DE LA LUMIÈRE

par le Professeur P. ZEEMAN

« De tous les hommes qui ont consacré leur existence aux découvertes expérimentales, aucun n'a jamais approché MICHEL FARADAY, par le nombre, la variété et l'importance des phénomènes nouveaux que ses travaux ont révélés ». C'est en ces termes que Sir ARTHUR SCHUSTER résume, admirablement, le résultat final des travaux de FARADAY, dans le petit volume « Britain's Heritage of Science », édité par lui et par Sir A. E. SHIPLEY.

Si, parmi les découvertes de FARADAY, la première place doit être donnée à ses recherches sur l'induction électromagnétique et la seconde à ses travaux sur la décomposition chimique d'un liquide par le courant électrique, le troisième point culminant, dans le domaine de ses découvertes, est représenté par la rotation magnétique du plan de polarisation de la lumière ; c'est un des faits qui illustrent, de la manière la plus claire, son désir de trouver un lien commun entre toutes les forces que, dans les domaines variés de la physique, on regardait comme des entités séparées.

Les contemporains de FARADAY acceptèrent les splendides résultats qu'il annonçait, mais ils ne purent le suivre dans les vues théoriques qui guidaient ses recherches.

Son intelligence opérait sur les centres de force et sur les lignes joignant ces centres et il fixait l'acuité de sa vision mentale sur l'espace occupé par ces lignes.

Les idées qui conduisirent FARADAY à sa découverte fondamentale de la rotation magnétique du plan de polarisation de la lumière, autrement dit de l'effet FARADAY, sont résumées par lui dans le premier paragraphe des 19es séries (1845) de ses « Experimental researches in electricity ». Nous y lisons : « J'ai eu depuis longtemps l'opinion, qui atteint presque la valeur d'une conviction, partagée, je crois, par d'autres hommes passionnés pour les sciences naturelles, que les formes va-

riées sous lesquelles se manifestent les forces matérielles ont une origine commune ; ou, en d'autres termes, qu'elles sont en relations si directes et en une telle dépendance mutuelle, qu'elles sont transformables les unes dans les autres et exercent des actions équivalentes. Dans les temps modernes, les preuves de leur convertibilité se sont abondamment accumulées et l'on a commencé à déterminer leurs valeurs équivalentes ».

Arago avait découvert en 1811 que, quand un rayon de lumière polarisée dans un plan a traversé une lame de quartz dont la section est perpendiculaire à l'axe, son plan de polarisation, à la sortie, a tourné d'un certain angle. La façon la plus facile de réussir l'expérience est de placer deux prismes Nicol, ou tout autre appareil polarisant, devant une flamme de sodium, les prismes étant orientés de telle sorte que l'œil de l'observateur ne reçoive plus de lumière. Si maintenant, on introduit une plaque de quartz entre les prismes, la lumière passe de nouveau mais on peut l'éteindre par la rotation d'un des prismes. Ceci montre que la lumière reste encore polarisée dans un plan, mais que ce plan a tourné d'un certain angle. Cet angle est mesuré par celui dont le Nicol doit être tourné depuis sa première position correspondant à l'obscurité, jusqu'à la seconde ; la preuve que la rotation ne se produit pas à la surface de la lame de cristal, mais bien à l'intérieur, c'est que les mesures effectuées sur des lames d'épaisseurs différentes donnent un angle de rotation proportionnel à l'épaisseur de la lame employée.

Les vibrations linéaires du rayon, qui lui sont perpendiculaires, changent continuellement de direction dans l'espace pendant leur propagation : elles sont disposées, le long du rayon, comme les marches d'un escalier en colimaçon.

Le plan de polarisation, perpendiculaire aux vibrations, tourne du même angle. Quelques cristaux de quartz font tourner le plan de polarisation à droite, d'autres à gauche. Beaucoup d'autres cristaux font tourner le plan de polarisation. Des liquides, comme la térébenthine, les solutions de sucre, de tartrates, nombre d'autres substances, ont la même propriété.

En août 1845 Faraday recommença, pour la sixième fois, à chercher une relation entre la lumière et le magnétisme. Cette fois, il réussit. Il prit un morceau du verre lourd, au borosilicate de plomb, qu'il avait fabriqué pendant la première période de sa vie scientifique, alors qu'il cherchait à améliorer les propriétés du verre d'optique.

Un faisceau lumineux, émanant d'une lampe ARGAND, était polarisé et il l'observait à travers un prisme NICOL. Sur le trajet du faisceau polarisé, il plaça une plaque de verre lourd de 5 cm² et de 12,5 mm d'épaisseur ; elle se comportait dans le tube comme toute substance inactive dans le dispositif d'ARAGO.

Au moyen d'un puissant électro-aimant, il fit passer des lignes de force magnétiques, en même temps et dans la même direction que le faisceau lumineux. Le courant dans l'électro-aimant étant interrompu, le NICOL était tourné à la position d'extinction ; mais, lorsque FARADAY envoya un courant dans les enroulements, l'image de la flamme apparut aussitôt et resta visible tant que le courant fut maintenu. L'interruption du courant la fit disparaître instantanément.

Un fait nouveau et d'une extrême importance, venait d'être découvert, après une véritable lutte avec la nature.

Après avoir obtenu ce résultat, FARADAY inscrivit dans son journal, à la date du 13 septembre 1845, ce commentaire laconique : « assez fait pour aujourd'hui. »

Le phénomène découvert par FARADAY diffère essentiellement de la rotation naturelle du quartz. Quand la lumière traverse le quartz, puis est réfléchie en arrière, la rotation finale du plan de polarisation est nulle, tandis que la rotation dans le verre magnétisé est doublée, si la lumière est réfléchie en arrière le long des lignes de force magnétique. On le comprendra en se représentant que, si dans le champ magnétique, la lumière incidente passe du pôle nord de l'aimant au pôle sud, le faisceau réfléchi suit la direction opposée.

La découverte de FARADAY trouva bientôt divers champs d'application, et elle prit aussi de l'importance du fait de la création, par MAXWELL, de la théorie de la lumière, impliquant un éther unique pour la lumière, l'électricité et le magnétisme, comme FARADAY l'avait obscurément entrevu.

Etude des flammes

Pour en venir à des développements plus récents, le Dr KERR, de Glasgow, découvrit en 1876, que, lorsque la lumière est réfléchie par un miroir magnétisé, il se produit un léger changement dans l'état de polarisation. Cet effet peut être défini en gros comme une rotation du plan de polarisation, pouvant atteindre un demi degré dans le cas de la réflexion sur un miroir de fer.

De beaucoup plus grande importance est l'effet, découvert par

l'auteur en 1896 et qui implique les phénomènes produits en spectroscopie par un champ magnétique.

Quand une flamme, ou une étincelle électrique, émettant un spectre de raies, est placée dans un champ magnétique intense, le spectre est modifié. Chaque raie se sépare en plusieurs composantes, chacune ayant ses caractéristiques particulières de polarisation et d'intensité. Dans les cas les plus simples, on observe 2 ou 3 raies, 2 quand on regarde dans la direction du champ, 3 dans la direction perpendiculaire, mais beaucoup plus fréquemment, on voit la raie primitive se résoudre en un grand nombre de composantes, jusqu'à 15 ou 20. Cette complication, ou ce qui paraît d'abord tel, s'est révélée être d'une grande valeur pour l'étude de la nature des forces à l'intérieur de l'atome.

Lorentz, s'appuyant sur sa théorie des électrons, a montré comment il était possible d'expliquer le triplet type et ses polarisations et cela peu après ma première publication, qui ne faisait état d'aucune théorie particulière.

Un beau théorème, de Sir Joseph Larmor, nous permet de décrire, d'une manière très simple, le mouvement de l'électron dans le champ.

Le signe et la charge spécifique de l'électron radiant ont pu être déterminées par moi dès le début de mes recherches. Mais ce n'est que récemment, grâce à l'introduction de l'hypothèse que l'électron constituerait lui-même un aimant, qu'il m'a été possible d'expliquer l'effet anormal, ce nom collectif des cas difficiles. Ceci même n'est pas le dernier mot sur le sujet, car on a montré que, de la structure superfine observée sur chacune des composantes après résolution, on pouvait tirer des notions sur le noyau même de l'atome. Une application pratique de la résolution magnétique des raies du spectre, est la mesure des champs magnétiques très puissants, découverts par Hale, à l'observatoire du Mont Wilson, dans les taches du soleil.

Comme conclusion, on peut noter que, en 1862, Faraday prit pour objet de ses dernières recherches expérimentales la relation entre la lumière et le magnétisme. Il entreprit, mais en vain, de déceler une modification, sous l'action d'un aimant puissant, des lignes du spectre d'une flamme. Il ne put déceler aucun effet, parce que, à cette époque, la puissance des spectroscopes et la technique des champs magnétiques étaient tout à fait insuffisantes. Des expériences concluantes ne purent être réussies qu'avec les spectroscopes à réseau de Rowland, que je pus appliquer en 1896 à l'étude d'un problème que Faraday, avec ses vues prophétiques extraordinaires, s'était posé dès 1862.

LE DIAMAGNÉTISME

LES PROPRIÉTÉS DES CRISTAUX

par le Professeur E. V. APPLETON, F. R. S.

Dans son livre « de Magnete », publié en 1600, le Dr WILLIAM GILBERT, médecin ordinaire de la Reine ELISABETH, exposa pour la première fois, d'une manière scientifique, les propriétés des aimants et donna une explication de l'orientation du compas magnétique en l'attribuant au fait que la terre est elle-même un aimant. GILBERT ne s'occupait que du fer et de ses composés, dont les propriétés magnétiques sont si remarquablement accusées. Il était réservé à MICHEL FARADAY de rechercher les propriétés magnétiques de toutes sortes de substances, solides, liquides et gazeuses et de les grouper suivant leurs principales classifications.

L'emploi de méthodes beaucoup plus sensibles que celles dont avait pu disposer GILBERT, lui permit d'établir le fait général, qu'aucun corps connu n'est insensible aux forces magnétiques, si celles-ci sont suffisamment intenses.

Le fait qu'un aimant attire un clou de fer ou une aiguille d'acier est familier à tous. Moins connu est celui, noté pour la première fois par BRUGMANS en 1778, qu'un morceau de bismuth se comporte tout différemment : il est repoussé par l'aimant.

Ce ne fut cependant qu'à la suite des recherches très complètes poursuivies par FARADAY qu'il fut reconnu que tous les autres corps se comportent, quoique à un degré moindre, soit comme le fer et l'acier, soit comme le bismuth. FARADAY montra que les propriétés du fer et du bismuth devaient être regardées, non comme d'une nature exceptionnelle, mais seulement comme se manifestant à un degré exceptionnel. La réussite de ses expériences était due en partie à l'emploi de l'électro-aimant en fer à cheval, aujourd'hui célèbre, de la *Royal Institution*, qui lui permit d'obtenir une action magnétique intense. Mais elle était due aussi à la grande sensibilité de l'essai choisi pour déceler la propriété magnétique cherchée. Cet essai consistait à suspendre une

tige de l'échantillon à examiner entre les pôles d'un électro-aimant, au moyen d'un fil fin de 2 m de long. Après avoir laissé l'échantillon suspendu arriver au repos, sans que l'électro-aimant fût excité, on envoyait brusquement le courant d'excitation et on observait le déplacement de l'échantillon.

Faraday reconnut, comme il s'y attendait, que les tiges de substances magnétiques ordinaires telles que le fer, se plaçaient, sous l'influence du champ magnétique, suivant la ligne joignant les deux pôles de l'aimant. C'est ce qu'il appelait la position axiale. Mais, avec une tige de verre lourd, le résultat était entièrement différent. La tige se plaçait finalement, au repos, à angle droit avec la direction axiale, sa longueur étant perpendiculaire à la ligne joignant les deux pôles. C'est ce qu'il appelait la position équatoriale.

Ces résultats préliminaires conduisirent Faraday à soumettre à l'action de son aimant les corps les plus divers. Sels minéraux, tissus animaux et végétaux, toutes ces substances furent essayées. Il reconnut qu'elles se comportaient, soit comme le fer et elles devaient être appelées magnétiques, soit comme le verre ou le bismuth et elles devaient être rangées dans une classe nouvelle, celles des substances dites diamagnétiques. La variété des corps ainsi étudiés par Faraday est très remarquable.

En rendant compte de ses expériences devant la *Royal Society*, le 18 décembre 1845, il nota combien il avait trouvé étrange que des fragments de bois, des morceaux de bœuf ou de pomme, fussent attirés ou repoussés par l'aimant. Il alla jusqu'à dire que, « si un homme pouvait être suspendu et placé dans un champ magnétique, il s'orienterait équatorialement », car il avait reconnu comme diamagnétiques toutes les substances dont il est formé, y compris le sang.

Dans ce compte rendu, Faraday fait une mention spéciale de la lenteur du déplacement d'une baguette de cuivre, lenteur qu'il explique complètement par l'action des courants électriques induits dans la masse du métal. Ce sont ces courants que nous appelons maintenant courants de Foucault.

Le résultat de ses premières séries d'expériences ne permettait à Faraday de placer les gaz, ni parmi les corps magnétiques, ni parmi les diamagnétiques. Autant qu'il pouvait l'affirmer, ils ne manifestaient aucune propriété magnétique et il inclinait par suite à les placer, avec le vide, dans une classe intermédiaire. Mais, en 1847, il reprit l'étude de la question. Stimulé par la découverte qu'avait faite

Bancalari de la répulsion d'une flamme par un aimant, Faraday put démontrer qu'une flamme doit être classée comme diamagnétique. Ceci le conduisit à étudier de nouveau les propriétés des gaz et, cette fois, avec plus de succès, car il démontra que les gaz différaient certainement entre eux par la valeur de leurs propriétés magnétiques.

Action « magnéto-cristalline ».

Dans une dernière série d'expériences, Faraday étudia les relations entre les propriétés magnétiques et la forme cristalline. Il fut attiré vers cette question par les résultats embarrassants qu'il avait souvent obtenus en opérant sur le bismuth. Il avait l'habitude, pour l'examen magnétique, de fabriquer par fusion des cylindres de bismuth, qu'il laissait se solidifier dans un tube de verre. Ce procédé favorisait naturellement la formation de cristaux et ce fut sur des échantillons ainsi obtenus, qu'il releva des résultats anormaux. Quelquefois, ces masses allongées se refusaient à prendre la position équatoriale caractéristique du bismuth et de tous les corps diamagnétiques soumis à l'expérience.

Parfois elles se plaçaient obliquement et parfois suivant la direction axiale, comme une substance magnétique.

Cette constatation et d'autres semblables, faites sur un grand nombre d'autres corps cristallisés, amena Faraday à conclure qu'il avait affaire à des phénomènes complètement différents de ceux du magnétisme et du diamagnétisme observés par lui jusqu'alors. Il était convaincu qu'il s'agissait de forces moléculaires et il écrivait : « Il paraît impossible de concevoir ces résultats, autrement que par une réaction mutuelle de la force magnétique et de celle qu'exercent les unes sur les autres les molécules du cristal ». Il appela la nouvelle force, « magnéto-cristalline », et il formula à ce sujet cette loi générale : « La loi du phénomène paraît être que la ligne ou l'axe de la force magnéto-cristalline, (résultante des actions de toutes les molécules), tend à se placer parallèlement ou tangentiellement à la courbe magnétique, ou ligne de force magnétique passant au point où est placé le cristal. »

Il entendait par là que tout cristal possède un axe magnéto-cristallin, en relation avec sa forme cristalline, qui doit se placer axialement dans un champ magnétique uniforme. Sa conviction que la force magné-cristalline devait être distincte des forces magnétiques et diamagnétiques, était basée sur cette observation qu'elle n'était ni une attraction, ni une répulsion, mais qu'elle produisait seulement des rotations.

Les observations de FARADAY sur la question prirent un regain d'intérêt lorsqu'on les rapprocha de certaines autres dues au Professeur PLÜCKER de Bonne qui, ayant à sa disposition un électro-aimant, établi avec les mêmes dimensions et avec la même puissance que celui de FARADAY, avait, lui aussi, cherché une relation entre les propriétés magnétiques et la forme cristalline. Opérant sur un simple cristal de tourmaline, qui se comportait en général comme un corps magnétique, il reconnut que, si on le suspend avec son axe optique dans un plan horizontal, il se comporte comme s'il était diamagnétique.

A la suite de ces recherches, PLÜCKER arriva à la conclusion que, si un échantillon de cristal était suspendu par un fil perpendiculaire à son axe optique, il se plaçait, sous l'influence magnétique, avec son axe optique dans la position axiale, si le cristal était optiquement positif, et dans la position équatoriale, s'il était optiquement négatif. Comme FARADAY, PLÜCKER insista sur le fait que ces effets étaient dus à une force indépendante et distincte des effets magnétiques et diamagnétiques de la masse générale du cristal.

Théories modernes

Les phénomènes embarrassants de l'action magnéto-cristalline, ne reçurent d'explication satisfaisante, ni de FARADAY, ni de PLÜCKER. Il était réservé au Professeur J. TYNDALL, successeur de FARADAY à la *Royal Institution*, de la faire connaître. TYNDALL montra qu'un champ magnétique, agissant sur un corps diamagnétique, y induit des pôles de sens opposé à ceux induits sur un corps magnétique. Ce point établi, TYNDALL n'avait plus qu'à supposer que les propriétés diamagnétiques ou magnétiques étaient différentes le long des différents axes d'un cristal, pour expliquer, par une théorie purement mécanique, les divers effets observés par FARADAY et par PLÜCKER.

A la relation générale, établie par PLÜCKER entre les propriétés magnétiques et optiques d'un cristal, les recherches expérimentales très complètes de TYNDALL révélèrent quelques exceptions. Des découvertes remarquables sur les rapports entre les propriétés magnétiques et le clivage des cristaux sortirent aussi de cette série de recherches.

FARADAY avait dit que la force magnéto-cristalline n'était ni une attraction, ni une répulsion et qu'elle n'était ni magnétique, ni diamagnétique. Jusque là, il avait raison, car elle n'est ni l'une ni l'autre, mais la résultante des deux. Les problèmes de la force et de l'action magnéto-cristalline ont cessé de se poser ; seuls subsistent ceux du magnétisme et du diamagnétisme.

Quoique la découverte du diamagnétisme eût été faite par FARADAY dès 1845, ce ne fut qu'en 1905 que fut proposée une théorie acceptable du phénomène. AMPÈRE et WEBER avaient suggéré que les effets magnétiques dans le fer et l'acier pouvaient être attribués à l'existence de courants électriques intérieurs. L'effet magnétique était ainsi regardé comme résultant de l'action de millions de circuits électriques de grandeur moléculaire. La structure attribuée à ces magnétons, comme on les appelle maintenant, a varié avec le temps, suivant les théories physiques à la mode. Au temps de WEBER, on supposait que chaque circuit moléculaire consistait en « un courant électrique continu, circulant dans un sillon sans résistance »; plus tard, ce fut un électron, circulant à vitesse élevée, le long d'un orbite moléculaire, tandis qu'actuellement c'est l'électron à mouvement de navette qui est en faveur

En 1905, LANGEVIN, écrivant à une époque où le mouvement des électrons sur des orbites circulaires était considéré comme constituant les éléments magnétiques ultimes, montra comment pouvait s'expliquer la différence entre les corps magnétiques et diamagnétiques. Admettant ce mouvement des électrons, il indiqua qu'un champ magnétique devait changer leur vitesse et, d'autre part donner à tous les orbites une même orientation. La déviation des orbites devenait la cause de l'effet magnétique, tandis que la modification de la vitesse orbitale produisait l'effet diamagnétique. En d'autres termes, les corps seraient intrinsèquement et à la fois, magnétiques et diamagnétiques, les propriétés extérieures de chaque substance étant déterminées par celle des deux influences qui est prépondérante.

Les idées de LANGEVIN se sont révélées comme fructueuses et stimulantes et, avec quelques modifications récentes, elles paraissent avoir réussi à expliquer, pour une grande part, les phénomènes magnétiques. Mais le sujet se trouve être fort compliqué par une difficulté concernant la classe des substances magnétiques. Les propriétés des corps appartenant à la classe diamagnétique ne diffèrent pas notablement en degré, tandis que, dans la classe magnétique, les différences de grandeur des qualités magnétiques sont énormes. Cette grande diversité rend très difficile d'établir une théorie magnétique embrassant, comme FARADAY voulait le faire, « les propriétés magnétiques de toutes les substances ».

RÉCEPTEURS MODERNES DE TÉLÉGRAPHIE SANS FIL

SÉLECTIVITÉ ET VOLUME

Radio-Gramophones.

par le Professeur W. H. Eccles, F. R. S.

La radio-diffusion est une des branches d'un sujet plus général, connu sous le nom de radio-téléphonie. Elle s'est rapidement développée et des stations émettrices, en nombre croissant et de puissance toujours plus grande, ont été établies au cours des 10 dernières années. A première vue, cet accroissement des stations semble tout à l'avantage de l'auditeur, mais en fait, si celui-ci ne dispose que d'un récepteur simple, il entend simultanément deux ou trois programmes, si les longueurs d'ondes transmises par les postes sont à peu près les mêmes, d'où confusion et exaspération. Aussi, quand le nombre des stations émettrices a augmenté, les appareils récepteurs ont ils été modifiés en vue de faciliter l'accord avec la station désirée et de l'éviter avec celles de longueurs d'ondes différentes.

Le poste employé au début de la radio-diffusion était essentiellement constitué d'un fil aérien, ou antenne, interceptant les ondes et devènant le siège de forces électriques qui leur étaient proportionnelles. Cette antenne était couplée à un circuit oscillant, comportant généraralement une bobine d'inductance et un condensateur réglable ; il pouvait être accordé sur les ondes reçues, en ajustant le condensateur; dans ce circuit, les forces électriques existant dans l'antenne, produisaient des courants de circulation oscillatoires, qui, par résonance, développaient des forces électriques beaucoup plus grandes que celles de l'antenne. Dans les appareils les plus simples, ces oscillations électriques agissaient directement sur un détecteur, qui les convertissait en un courant de direction unique ; mais, dans les appareils plus compliqués, les oscillations du circuit accordé traversaient un amplificateur à haute fréquence, avant d'aller au détec-

teur ; d'où cette conséquence, que les courants redressés étaient beaucoup plus intenses que dans le premier cas. De plus, ces courants redressés passaient dans un amplificateur à basse fréquence, lorsqu'ils devaient actionner un haut-parleur, au lieu d'un téléphone.

D'autre part, la station transmettrice a pour fonction de modifier l'énergie des ondes suivant celle des sons émis devant le microphone du studio ; c'est ce qu'on appelle la modulation.

En conséquence, le courant redressé sortant des détecteurs d'écoute varie aussi, dans le temps, avec le courant déterminé par les sons dans le microphone du studio. Ainsi, quand les courants redressés traversent le téléphone ou le haut parleur de l'auditeur, le résultat est en grande partie le même que si ces appareils étaient reliés directement au studio. Les récepteurs employés aujourd'hui sont, en principe, les mêmes que jadis, mais ils ont été munis de parties additionnelles dans le but d'accroître la sélectivité et, dans bien des cas, le volume du son débité.

Portée et Puissance.

Les récepteurs à cristal utilisent, comme détecteur, le contact entre cristal et métal, ou entre deux cristaux. Ils comportent, soit un seul circuit accordé, soit deux circuits, le second type étant plus sélectif. Le récepteur à circuit unique peut réussir à séparer deux émissions d'égale force, même si elles sont suffisamment voisines pour pouvoir être entendues fortement au casque, si l'antenne n'est pas grande et si le détecteur est branché sur une fraction de la bobine. On tend maintenant à remplacer ces récepteurs par des récepteurs à meilleur marché, à une lampe, qui ont le même circuit et utilisent aussi des casques. L'emploi de la réaction dans les récepteurs à une lampe permet d'accroître considérablement la sensibilité et de recevoir les émissions de stations éloignées. Quand la lampe est une pentode, c'est-à-dire si elle est munie de 5 électrodes, il est possible de faire fonctionner un haut parleur à une distance modérée de la station transmettrice.

Des récepteurs à deux lampes, pour la réception de la station locale sur haut parleur, ont été très en faveur, le dispositif comportant de préférence une lampe détectrice par courbure de la caractéristique grille et une lampe amplificatrice basse fréquence. L'emploi judicieux de la réaction permet d'obtenir une bonne audition des stations étrangères les plus rapprochées; mais les postes à deux lampes qu'on trouve

sur le marché ne prétendent pas à une grande sélectivité. Les postes modernes à trois lampes comprennent généralement une lampe à grille-écran pour l'amplification des oscillations de haute fréquence, une lampe détectrice et une pentode ou lampe de puissance, comme amplificatrice à basse fréquence. La sélectivité s'obtient en accordant les circuits de grille et d'anode de la lampe à haute fréquence.

Les postes à quatre lampes comprennent d'ordinaire deux lampes à grille-écran pour l'amplification à haute fréquence, une lampe détectrice et une amplificatrice à basse fréquence ; mais quand le poste est du type transportable, il comporte généralement une seule lampe à haute fréquence et deux lampes à basse fréquence. Dans ces postes, il est désirable d'obtenir une bonne sélectivité et on y arrive maintenant en employant des filtres passe-bande. Ces filtres consistent en deux ou trois circuits couplés qui sont combinés, suivant des principes bien établis, pour ne laisser passer de l'antenne à la première lampe qu'une bande étroite de longueurs d'ondes. En théorie, cette bande de longueurs d'ondes devrait être juste assez large pour permettre le passage des ondes de toutes les stations que l'on désire entendre, modulées par une note haute, par exemple de quatre octaves au-dessus du C moyen et pour arrêter les autres.

Les récepteurs super-hétérodynes conviennent spécialement aux conditions modernes, car ils offrent de hautes possibilités sélectives. Les meilleurs ont un étage à grille-écran, destiné à amplifier les oscillations à haute fréquence reçues, un oscillateur séparé réglable pour superposer une fréquence locale, de manière à donner, aux oscillations reçues, une fréquence intermédiaire constante ; un amplificateur à grille-écran de fréquence intermédiaire avec filtre passe-bande et un étage amplificateur basse fréquence, placé après le second détecteur.

Récemment, la télégraphie sans fil a été associée au gramophone. Celui-ci a suivi le développement de la méthode électrique de reproduction des enregistrements phonographiques. Dans cette méthode, l'aiguille qui suit les rainures de l'enregistreur est liée mécaniquement à un aimant, ou à une bobine mobile, de manière à engendrer des courants acoustiques pouvant être entendus dans un téléphone. Ces courants peuvent traverser un amplificateur à basse fréquence et être amplifiés dans toute la mesure voulue pour actionner un ou plusieurs haut-parleurs.

Puisque l'étage amplificateur à basse fréquence d'un récepteur sans

fil est identique à celui d'un gramophone électrique, il est aisé d'obtenir que les courants, engendrés par le pick-up du gramophone, passent à la place appropriée dans le récepteur sans fil, pour être reproduits par les hauts parleurs de l'installation. C'est ainsi qu'a été réalisé l'appareil combiné appelé radio-gramophone. D'ordinaire, le plateau du gramophone est placé sous un couvercle à charnière à la partie supérieure du meuble; le récepteur sans fil, dans un châssis métallique, est contenu dans l'armoire placée au-dessous; le cône du haut parleur s'ouvre sur un côté de l'armoire, qui est perforé de façon à former une grille ornementale. Ces postes sont généralement alimentés par le courant du réseau, plutôt que par des batteries ou des moteurs à ressort.

L'ÉLECTRO-CHIMIE

FARADAY ET LES LOIS DE L'ÉLECTROLYSE

Naissance de nouvelles industries.

par le Professeur F. G. DONNAN, F. R. S.

La nature des relations entre les phénomènes électriques et chimiques forme une des branches les plus importantes et les plus attrayantes de nos connaissances, leur étude expérimentale et leur interprétation théorique, ont très grandement contribué au développement des deux sciences, Chimie et Electricité.

D'actives recherches commencèrent dans ce domaine à la fin du dix-huitième siècle, alors que le seul appareil dont on disposait était la machine électrique à frottement, produisant de l'électricité à haut potentiel, mais en quantité relativement faible.

Des résultats remarquables furent cependant obtenus par le savant hollandais VAN MARUM et ses collègues, qui avaient à leur disposition la très puissante machine électrique dont la construction avait été rendue possible par la fameuse fondation TEYLER.

Les décharges permirent de décomposer divers gaz. : de réduire l'eau à ses constituants, de convertir des métaux en « chaux » (oxydes métalliques) ; diverses « chaux » furent revivifiées, c'est-à-dire décomposées en métal et oxygène.

HENRY CAVENDISH, en Angleterre, fit cette découverte remarquable que l'air atmosphérique pouvait être converti, par les décharges électriques, en acides nitreux et nitrique. La fin du dix-huitième siècle et les premières années du dix-neuvième siècle virent un grand et merveilleux progrès. L'anatomiste et physiologiste italien, ALOYSIUS GALVANI, avait découvert ce qu'il croyait être « l'électricité animale ». Il constata que si les nerfs cruraux et les muscles des pattes d'une grenouille, fraîchement disséquée, étaient reliés extérieurement par des conducteurs métalliques, il se produisait de violentes contractions musculaires, semblables à celles induites par les décharges électriques. Il pensa que cet effet était dû à la décharge de l'électricité animale, accumulée dans les tissus musculaires.

La batterie voltaïque.

Cette théorie erronée fut bientôt corrigée par le fameux physicien italien, Alessandro Volta, qui montra que le mécanisme nerfs-muscles de la grenouille agissait simplement comme un détecteur sensible de courants électriques et que le courant se produisait, en réalité, au courant de métaux différents, séparés par un conducteur humide. C'est de là que sortit la fameuse pile de Volta, ou batterie voltaïque, l'ancêtre de la batterie primaire d'aujourd'hui et qui consistait en une série de paires de métaux, disposées en tandem, chaque paire de métaux différents étant séparée par un « conducteur mouillé ». La batterie voltaïque se répandit dès lors rapidement. La science fut bientôt mise en possession d'une arme nouvelle, susceptible de produire de l'électricité par grandes quantités. Les effets chimiques de cette électricité étaient surprenants et ils furent ardemment étudiés par les expérimentateurs, en de nombreux pays. Au premier rang de ceux-ci était le brillant et jeune professeur de la *Royal Institution*, nouvellement fondée dans Albemarle-Street, Humphry Davy. Au moyen d'une forte batterie voltaïque, il réussit à décomposer les alcalis caustiques et découvrit ainsi les métaux sodium et potassium. Ce fut un des premiers triomphes scientifiques de la *Royal Institution*.

La décomposition des substances chimiques par un courant électrique est connue sous le nom d'électrolyse. L'assistant et successeur de Humphry Davy à la *Royal Institution*, Michel Faraday, découvrit les deux principales lois quantitatives qui la gouvernent, soit la proportionnalité de la décomposition chimique à la quantité d'électricité employée, (c'est-à-dire au produit du courant électrique par le temps), et la proportionnalité des poids des divers corps, libérés par une même quantité d'électricité, à leurs poids de combinaison chimique. Faraday établit ainsi un rapport étroit entre l'électricité et la combinaison chimique. Bien des années après, le fameux physicien allemand Hermann Helmholtz, dans sa conférence commémorative sur Faraday, prononcée devant la *Chemical Society*, fit ressortir que les lois de Faraday sur l'électrolyse impliquaient l'existence d'atomes d'électricité. Ainsi fut pressentie l'existence de l'électron, la grande et fondamentale découverte, faite par Sir J. J. Thomson, à la fin du dix-neuvième siècle.

Théorie d'Arrhenius.

Les substances dont les solutions aqueuses conduisent le courant électrique sont les sels, les acides et les alcalis. Ces « électrolytes » sont formés de deux constituants, polarisés, c'est-à-dire portant des charges de signes inverses et que FARADAY a appelé des « ions ».

Les recherches du Professeur allemand HITTORF, à l'*Université de Münster*, ont jeté beaucoup de lumière sur les déplacements relatifs de ces ions dans les solutions qui conduisent le courant électrique. Il s'éleva, toutefois, de nombreuses controverses, sur la « durée d'existence libre » de ces constituants polarisés d'électrolytes en solution. La libération des ions aux électrodes était-elle due, comme le supposait le Baron von GROTHUSS, à l'orientation, suivant une chaîne, des molécules d'électrolyte sous l'action de la force électrique, à la libération des constituants aux extrémités de la chaîne, avec neutralisation par la charge des électrodes et à la recombinaison simultanée tout le long de la chaîne ? ou bien, dans une solution électrolytique, les ions étaient-ils, comme le voulait CLAUSIUS, libérés occasionnellement pour une très courte durée, limitée par la probabilité d'une rencontre très rapide avec les molécules voisines ?

Toutes ces questions et beaucoup d'autres connexes furent résolues par la théorie de la dissociation électrolytique (ionisation dans une solution) du fameux Professeur suédois SVANTE ARRHENIUS, dont l'œuvre a été appuyée et amplement confirmée par les importantes recherches de KOHLRAUSCH, OSTWALD, et VAN'T HOFF. La théorie d'ARRHENIUS permit de déterminer quantitativement les concentrations des ions dans une solution électrolytique. On reconnut que les sels, les acides et les bases en dissolution aqueuse, se dissocient facilement en ions.

Bien que modifiée en certains détails, la théorie de l'ionisation d'ARRHENIUS a soutenu l'épreuve du temps ; elle constitue indubitablement l'une des plus grandes découvertes qui aient jamais été faites dans la science. La théorie ionique d'ARRHENIUS permit à NERNST d'établir une théorie quantitative de la force électromotrice des piles électriques et d'apporter ainsi une solution satisfaisante à un problème qui avait donné lieu à tant de controverses depuis l'époque de VOLTA.

Une pile ou batterie voltaïque, engendrant un courant, produit de l'énergie sous forme électrique. Quelle est la source de cette énergie ? La loi de conservation de l'énergie avait été découverte au XIX^e^ siècle.

Il était donc naturel d'égaler l'énergie électrique produite à l'énergie chimique utilisée dans la batterie. En ce faisant, toutefois, on négligeait deux autres possibilités, car une certaine portion de l'énergie chimique pouvait se transformer en énergie calorifique, ou encore une portion de l'énergie calorifique existante pouvait se transformer simultanément en énergie électrique. La solution correcte du problème fut donnée par WILLARD GIBBS en Amérique et postérieurement par HELMOLTZ en Allemagne. Le fonctionnement de la batterie fut ainsi mis en plein accord avec les lois de la thermodynamique et la théorie de l'énergie.

Atomes de matière

Ce très rapide exposé des découvertes électro-chimiques nous mène jusqu'au début du vingtième siècle. Que dirons-nous de la période suivante, celle de ces trente dernières années ? La merveilleuse découverte des deux unités d'électricité — l'électron, par Sir J. J. THOMSON, et le proton, par Lord RUTHERFORD — nous a amenés à admettre que les atomes de matière sont formés d'électricité. A un certain point de vue, par conséquent, toute la chimie est électrochimie. Les lois des combinaisons chimiques ne peuvent être exposées qu'en parlant d'électrons, tandis que la constitution des atomes ne peut l'être qu'en parlant de protons et d'électrons.

Nous n'avons plus le droit de considérer la physique et la chimie comme deux sciences séparées. Le monde matériel est un monde physico-chimique ; il n'y a plus qu'une seule science : la science physico-chimique.

Les découvertes électro-chimiques des 130 dernières années ont donné naissance à de grandes et importantes industries. L'aluminium, ce métal si utile, s'obtient en électrolysant une solution d'alumine (tirée du minerai appelé « bauxite ») dans un bain de cryolithe (fluorure double de sodium et d'aluminium).

200 000 tonnes de ce métal sont ainsi produites chaque année. Le sodium et le potassium s'obtiennent en électrolysant les alcalis en fusion. Le magnésium, le calcium et le béryllium, sont fabriqués par électrolyse de mélanges de sels fondus. La soude et la potasse caustiques, le chlore, les hypochlorites alcalins, les chlorates et les perchlorates, sont produits par l'électrolyse de solutions aqueuses de chlorures de sodium et de potassium. Le cuivre métallique est raffiné par électrolyse et le zinc métallique est maintenant produit industriellement par électrolyse de solutions acides de sulfate de zinc. L'eau oxy-

génée, important agent d'oxydation, de blanchiment et de stérilisation, peut être fabriquée par électrolyse. Les gaz hydrogène et oxygène, sont obtenus à un haut degré de pureté par l'électrolyse de l'eau, en présence d'électrolytes convenables. On prépare l'ozone par l'action de la décharge électrique silencieuse sur l'oxygène et, en Norvège, on fabrique les nitrates en faisant passer l'air dans l'arc électrique. De grandes quantités de carbure de calcium (qui sert à fabriquer l'acétylène et la cyanamide calcique) et une grande partie de l'acier et des ferro-alliagés, sortent du four électrique.

Les grandes industries de la galvanoplastie et de la galvanisation fournissent des exemples d'application de l'électrolyse à des besoins courants. L'art moderne de l'illustration des livres, revues et journaux, relève pour une grande part de l'électrolyse.

Les batteries voltaïques, primaires ou secondaires, (telles que l'accumulateur au plomb) reçoivent des applications nombreuses : téléphones, postes récepteurs de T. S. F., automobiles, camionnage, éclairage domestique, accumulation d'énergie électrique dans les stations centrales et dans les laboratoires scientifiques et d'autres encore.

En vérité, nous pouvons dire que la science électrochimique a donné naissance à de grandes et importantes industries et que ses applications se prêtent à des besoins aussi variés qu'utiles, dans toute communauté moderne.

L'avenir assurément nous réserve de plus grandes réalisations encore. Le physicien et l'ingénieur électricien travaillent constamment pour arriver à produire et à distribuer de l'énergie électrique sous d'énormes potentiels, (correspondant à une très haute pression ou à une très grande vitesse des électrons et des protons). La matière, telle que nous la connaissons aujourd'hui, sera probablement ramenée à ses constituants les plus ultimes et reconstituée sous des formes nouvelles, encore inconnues. Les électrons et les protons libérés recevront des vitesses opposées et si élevées que leur choc pourra les réduire en énergie radiante. Quelque grandes qu'aient été les découvertes des 100 dernières années, le bicentenaire de Faraday, en 2031, enregistrera certainement bien des choses dont nous ne pouvons guère nous faire une idée aujourd'hui. La riche corne d'abondance de la nature tient en réserve, pour l'humanité, bien des présents d'une valeur inconnue.

UN SIÈCLE DANS L'INDUSTRIE DES TRANSPORTS

L'AVÈNEMENT DE LA TRACTION ÉLECTRIQUE

Des charrettes aux chemins de fer

par le Dr S. Parker SMITH, D. Sc.

L'idée d'employer l'électricité pour la traction remonte presque à un siècle. Que ces essais, faits avec des moteurs du type à courant interrompu, prenant leur énergie à des batteries de piles, aient été condamnés à échouer, il n'y a guère lieu de nous en étonner. Le Professeur JACOBI, de Saint-Pétersbourg propulsa, en employant l'énergie électrique, un petit bateau sur la rivière Neva; il communiqua à FARADAY, en 1839, les résultats obtenus. Leur publication par FARADAY dans « London Philosophical Journal » détermina la venue au jour, grâce au Professeur FORBES, d'Aberdeen, des travaux de son concitoyen ROBERT DAVIDSON. Cet inventeur avait entrepris la construction de la première voiture électrique dès 1837 et, en septembre 1842, une locomotive de 5 t, construite par lui, fit des trajets d'essai à la vitesse d'environ 6 km/h, sur la ligne Edinburgh-Glasgow, alors en construction. Cette machine fut finalement brisée, à Perth, par des ouvriers de chemins de fer, qui en étaient jaloux.

En 1841, l'américain HENRY PINKUS prit en Angleterre des brevets qui faisaient prévoir le système de traction électrique moderne, avec station centrale, rail de retour et dispositifs de prise du courant sur la locomotive ; mais ce ne fut que vers 1860 que la dynamo à courant continu fut mise au point par des inventeurs d'Europe et d'Amérique, travaillant indépendamment les uns des autres.

La découverte, plus récente, de la réversibilité de la génératrice et du moteur, qui constitue une application pratique de la grande loi de l'induction électro-magnétique de FARADAY, conduisit au développement industriel de la traction électrique.

A l'exposition de 1879 à Berlin et à celle de 1881 à Paris, la Maison

Siemens exhiba un exemple pratique de transport par l'électricité et ce fut en cette même année 1881 qu'une courte ligne fut ouverte au trafic à Lichterfelde, Berlin. Le premier chemin de fer électrique public dans les îles Britanniques fut la ligne de la Chaussée des Géants, près de Portrush, dans le Nord de l'Irlande, qui fut électrifiée en 1883 par Siemens Brothers, de Woolwich et par le Dr John Hopkinson. Une centrale hydraulique fournissait du courant continu à 250 V à un troisième rail, placé le long de la voie. La même année, le chemin de fer électrique de Volk, à Brighton, était mis en service.

Réseaux de Tramways

Pendant plusieurs années après que la possibilité de la traction électrique eût été ainsi démontrée, les choses restèrent en un état assez chaotique, en raison de la grande diversité des solutions adoptées par les praticiens. Vers 1890, toutefois, apparurent des signes de normalisation et l'extension des tramways électriques et des chemins de fer sur route progressa rapidement. Le courant continu de 500 à 600 V, le trolley aérien, les moteurs-séries avec fonctionnement série-parallèle (dû à Hopkinson), les moteurs à engrenages à suspension par le nez et les commutateurs à soufflage magnétique, établirent peu à peu la supériorité de ce mode de traction et, au bout de peu d'années, presque toutes les grandes villes de ce pays eurent leur réseau de tramways.

Parmi les derniers perfectionnements accomplis, on peut noter la fermeture et la ventilation des moteurs, l'adoption des pôles supplémentaires, des amortisseurs, l'amélioration des engrenages et divers raffinements de construction.

En dehors du trolley, divers systèmes à plots ou à caniveau furent essayés, avec plus ou moins de succès, dans le but d'éviter le fâcheux aspect du système aérien. En dépit de son prix de revient élevé, le système à caniveau fut adopté sur le territoire de Londres. Ainsi, les tractions urbaines par chevaux, par câbles et à vapeur furent progressivement supprimées. Les progrès de la technique sont, toutefois, rapides et pendant la durée d'une seule génération, la concurrence des autobus à essence était devenue tellement active qu'un rapport officiel, de 1930, proclamait le tramway complément désuet.

La substitution au trolley d'un conducteur ou d'un rail en charge et l'emploi de moteurs plus puissants, permirent d'appliquer à la grande traction le système employé sur les tramways.

La compagnie du Chemin de Fer Aérien de Liverpool inaugura l'exploitation électrique en 1893, en vue de supprimer les risques d'incendie dans les docks. Le City et South London Railway, le premier « Tube », quoique prévu en funiculaire, adopta dès ses débuts, en 1890, les locomotives électriques. L'invention par Sprague, en 1895, du système à unités mutiples, rendit possible les auto-motrices ; le système à courant continu 600 V avec auto-motrices et remorques et quelquefois avec un quatrième rail comme conducteur de retour, est maintenant normalisé sur toutes les lignes de Londres.

A New-York et à Paris, l'électrification fut rapidement appliquée à des lignes de banlieue ; d'autres grandes villes ont maintenant des lignes électrifiées, soit au niveau du sol, soit aériennes, soit souterraines.

Sans la traction électrique, l'exploitation actuelle en ligne souterraine ou en tube ne pourrait même pas être imaginée.

En dehors des lignes en tube, il y a maintenant en Grande-Bretagne 900 km de lignes suburbaines ou métropolitaines électrifiées, soit en exploitation, soit en construction. La plupart se trouvent à Londres ou en Angleterre même et le système adopté presque partout est celui du courant continu à 600 V avec troisième rail.

L'électrification des lignes principales

On comprendra facilement qu'aussitôt démontrée la possibilité du transport par l'électricité, son application aux lignes principales ait été étudiée avec ardeur.

Au commencement du siècle, beaucoup de pays portaient à ce problème une attention sérieuse. Pour apprécier les conditions qui ont prévalu à cette époque, il faut se représenter que les applications du courant électrique, sous forme de puissance mécanique, étaient relativement peu développées et que les conditions économiques de la fourniture d'énergie n'étaient pas aussi bien connues que maintenant. Le système triphasé à 60 p:s n'avait pas été normalisé, le convertisseur synchrone à 50 p:s et le redresseur à mercure, devaient encore être mis au point. Les locomotives à commande par engrenages, autre que la simple suspension des tramways, ne virent le jour que plus tard et le problème de la transmission aux roues de la puissance des moteurs suspendus sur ressorts, présentait de grandes difficultés.

Un grand nombre des solutions essayées comportaient des bielles ou d'autres mécanismes à mouvement alternatif, application directe de ce qui était pratiqué sur les locomotives à vapeur.

Les problèmes secondaires, tels que celui de l'induction entre les circuits d'énergie et les circuits de signalisation, prirent dès le début une grande importance et devinrent des facteurs déterminants pour le choix du système à adopter. Il n'est donc pas étonnant que la « bataille des systèmes » ait commencé de suite.

Bientôt des objections furent faites au courant à 600 V, en raison de son coût élevé pour l'exploitation à grande distance, mais l'emploi du courant continu à de plus hautes tensions posait des problèmes techniques qui n'avaient pas encore été résolus. Le système triphasé présentait pour la grande traction des inconvénients qui lui étaient inhérents : la fréquence de 50 p:s était trop élevée pour des moteurs de locomotive sans engrenages ; le réglage de la vitesse, très compliqué, ne pouvait avoir qu'une amplitude très limitée ; enfin, l'emploi de deux lignes aériennes à potentiels différents est dispendieux et gênant aux aiguillages et aux croisements de voies. Restait le système monophasé et, sous ce rapport, deux faits furent bientôt reconnus : le manque d'adaptation à la traction, des moteurs d'induction monophasés et la nécessité du moteur à collecteur pour l'obtention des mêmes caractéristiques à vitesse variable, qu'avec le moteur à courant continu.

Peut-être aucun autre moteur ne fut-il étudié dans cette première période avec plus d'enthousiasme que le moteur monophasé à collecteur. Parmi les types variés qui furent alors essayés, le moteur-série surpassa tous ses rivaux et son emploi se répandit largement. Son succès cependant exigeait l'adoption d'une basse fréquence, de 25 ou 16,2/3 p:s, ce qui constituait un grave compromis.

Pour une installation de production et de conversion de courant triphasé à 50p:s, le système monophasé à 16,2/3 p:s n'offrait pas d'avantage marqué, au point de vue de la conversion et de la distribution, sur le courant continu à haute tension qui venait de se développer.

Comme alternative au moteur monophasé à collecteur, le système dit « split-phase » dans lequel le courant monophasé est converti en polyphasé sur la locomotive, pour alimenter des moteurs à induction, fut adopté dans les limites restreintes, mais parmi d'autres inconvénients il présentait celui de la difficulté de réglage de la vitesse.

Presque tous les systèmes possibles avaient été mis à l'épreuve au cours de cette période. Le résultat fut qu'on put prédire à coup sûr que tout pays d'Europe devant adopter à l'avenir et pour la première fois la traction électrique sur ses lignes, emploierait le courant continu à haute tension (1 500 V ou au-dessus), et prendrait l'énergie sur un réseau national triphasé à 50 p:s. Ce système, avec troisième rail

jusqu'à 750 V et conducteur aérien jusqu'à 1 500 V, a été officiellement recommandé pour la Grande Bretagne.

Le charbon et l'eau

Il faut noter qu'un grand nombre de raisons, autres que les raisons financières, ont conduit à électrifier les chemins de fer. Ainsi, la Suisse se préoccupait de ne plus dépendre du charbon importé et de développer ses ressources hydrauliques ; de plus, les longs tunnels et les pentes considérables y rendaient difficile la traction à vapeur. La Suède, également, désirait utiliser son énergie hydro-électrique et réduire ses dépenses en charbon étranger. La France dispose d'énergie hydraulique dans ses départements du Centre et du Midi, éloignés de ses bassins houillers. L'Allemagne développe ses installations hydrauliques, mais utilise aussi de la houille noire dans ses stations centrales. En Italie, il y a beaucoup de puissance hydraulique et pas de charbon ; les tunnels et les pentes y constituent des facteurs importants. Aux Etats-Unis on a eu recours à l'électrification, dans bien des cas, pour accroître la capacité du trafic. Le fait que la Suisse, l'Italie, la Suède et les Etats-Unis continuent à développer l'électrification des chemins de fer, peut être aussi considéré comme une preuve qu'il en résulte une saine économie. De tous les pays, c'est la Suisse qui a la plus grande proportion de chemins de fer électrifiés, soit 2 400 km ou 66 pour cent de la longueur totale de voies et ils transportent 85 pour cent du trafic total.

Le problème dans notre pays est, en quelque sorte, unique. La Grande Bretagne possède un réseau de chemins de fer presque sans rival et le charbon y est abondant. La question est donc surtout économique. A ce point de vue, on peut se référer au « rapport du *Comité d'Electrification des grands réseaux* de 1931 ». D'après les études faites, le nouveau capital à investir pour l'électrification des grandes lignes de Grande-Bretagne serait d'environ 261 000 000 livres, à répartir sur une période de 15 à 20 ans.

De plus, 80 000 000 livres devraient être dépensés par le *Comité Central de l'Electricité* et par les entrepreneurs autorisés, pour fournir l'énergie nécessaire aux sous-stations de traction et enfin 45 000 000 livres devraient être prévues pour les électrifications de banlieues.

Les avantages financiers attendus ne sont pas très attrayants, sauf pour l'électrification suburbaine, mais l'avantage global à prévoir est considéré comme suffisant pour mériter une étude sérieuse. Le projet est toutefois intéressant, car il montre pour la première fois ce

qu'implique le remplacement intégral de la vapeur par la propulsion électrique. L'électrification complète des chemins de fer apparaît comme devant entraîner une immobilisation de capital considérable, dont une grande partie serait absorbée par la voie et par l'équipement des sous-stations. D'autres systèmes, tels que les locomotives à accumulateurs, les locomotives électriques Diesel et autres, quoique pouvant convenir sur certaines lignes, voies de garage, etc... ne sont pas applicables à un réseau étendu, tels que ceux qu'on envisage.

Ce qui précède explique, dans une large mesure, la position prise actuellement par la Grande Bretagne, en ce qui concerne l'électrification des chemins de fer. La certitude que les constructeurs électriciens anglais sont en mesure d'entreprendre les travaux, résulte amplement du grand développement de l'électrification exécutée par eux au delà des mers. Jusqu'à un certain point, l'électrification des chemins de fer n'a pas été poussée avec autant d'intensité en ce pays que celle des tramways, ce qui est dû aux conditions existantes. Actuellement, toutefois, l'équipement des chemins de fer électrifiés est presque aussi fortement normalisé que celui des tramways.

LA FUSION DES MÉTAUX

L'ÉTABLISSEMENT D'UN FOUR A INDUCTION

Facteurs de production et prix.

par Sir Robert HADFIELD, F. R. S.

Le type le plus moderne de four à induction, connu sous le nom de four sans fer ou de four à induction à haute fréquence, tout en présentant, au point de vue pratique, des progrès techniques importants, reste néanmoins basé sur la découverte de l'induction électromagnétique par FARADAY.

Le type de four à noyau de fer est caractérisé par un flux magnétique intense et par un faible taux de variation du flux, autrement dit, il est à basse fréquence.

L'emploi de courants à haute fréquence permet d'obtenir un effet inductif suffisant, sans nécessiter l'emploi d'un noyau de fer pour concentrer le champ magnétique ou pour coupler les circuits primaire et secondaire.

En outre, il n'est plus nécessaire de donner au secondaire la forme d'un anneau fermé, des circuits secondaires fermés se constituant dans la masse du métal, le long de sa périphérie, où se produisent des « courants de FOUCAULT » ou tourbillonnaires.

Ce dispositif a permis de fondre le métal en une masse cylindrique, dans un creuset de forme facilement réalisable.

Il en résulte, par là même, une supériorité pratique considérable sur la disposition du métal fondu en forme d'anneau du premier type de four à induction à noyau.

Pour les usages industriels dans les ateliers, le four moderne d'induction à haute fréquence est constitué par un creuset ou récipient, autour duquel est enroulée une bobine refroidie par un courant d'eau.

Cette bobine est parcourue par le courant primaire que fournissent les génératrices.

Le four est supporté par un berceau qui peut osciller mécaniquement ou qui est conçu pour se prêter à toutes sortes de manipulations

suivant les nécessités du procédé employé. Ceci entraîne une simplicité et une commodité de construction qui constituent un avantage considérable.

L'équipement électrique varie beaucoup suivant le genre d'opérations à réaliser.

Les premiers modèles de laboratoire employés par NORTHRUP et d'autres, étaient des mécanismes compliqués et délicats. L'appareil de NORTHRUP était constitué par un circuit oscillant, comprenant un éclateur à mercure, une batterie de condensateurs et une bobine d'induction.

RIBAUD, à Strasbourg, employait du courant alternatif monophasé dont la tension était élevée à 5 ou 6 000 V par un transformateur statique ; une inductance variable était insérée dans le circuit primaire. Le courant à haute tension ainsi produit traversait un éclateur tournant, actionné par un interrupteur à grande vitesse refroidi à l'eau et inséré dans un circuit oscillant qui comprenait la bobine du four et les condensateurs voulus.

On emploie maintenant, pour les unités de petite capacité, l'oscillateur à lampe thermoionique et il est probable que son emploi sera étendu dans l'avenir même à des unités plus grandes.

Les fours les plus puissants sont actuellement alimentés par des convertisseurs rotatifs à grande vitesse ; l'installation est complétée par une batterie de condensateurs, un panneau de contrôle et une bobine d'induction.

Le refroidissement de la bobine par l'eau est indispensable.

Le corps même du four doit être constitué de matériaux non magnétiques, ou protégé par des écrans magnétiques.

Une des caractéristiques modernes est la bobine graduée, dans laquelle le pas et la forme des spires varient de manière à produire à l'intérieur un champ uniforme et parallèle, sur toute sa longueur, à l'axe de l'inducteur.

Un dispositif de contrôle automatique facilite la surveillance, améliore le facteur de charge et, par suite, abrège la durée de la fusion.

Une des qualités du four à induction sans fer, est la souplesse avec laquelle il se prête aux extensions.

On peut faire fonctionner un certain nombre de fours à haute fréquence, de même tension et de même fréquence, en les alimentant sur les mêmes barres omnibus.

Dispositifs de chauffage et creusets.

Un trait caractéristique du four à induction à haute fréquence, trait qui, à certains égards constitue une infériorité, est ce qu'on appelle l' « effet de source », qui se produit sur la charge fondue dans le creuset.

C'est un mouvement imprimé au métal par les courants d'induction et qui détermine une convexité à la surface supérieure de la matière fondue.

Dans le cas de la fusion de l'acier, cet effet peut supprimer complètement la stabilité d'une scorie nageant à la surface. Le mouvement du métal déplace la scorie radialement vers les parois du creuset auxquelles elle peut finalement adhérer. Toute possibilité de protection par la scorie disparaît alors et l'affinage, qui constitue un des buts importants du traitement de l'acier, ne peut plus être contrôlé.

On a proposé des expédients pour supprimer cet inconvénient ; ils se ramènent au « réglage électrique » du conducteur, obtenu par une disposition convenable du circuit qu'alimentent des prises échelonnées le long de la bobine. Ainsi, le simple maniement d'un interrupteur permet d'éviter la « surélévation » du métal et le niveau du ménisque est abaissé de 8 cm à zéro.

Dans les plus anciennes formes de fours, on employait des creusets et, en général, on les emploie encore dans les types de petites dimensions ; l'espace entre le creuset et la bobine est rempli d'un pisé fortement réfractaire.

La zircone et le silicate de zirconium se sont montrés propres à remplir ce but.

Dans les plus grands fours, on a généralisé l'usage des revêtements d'une seule pièce.

Dans les fours électriques ouverts, on emploie toujours le frittage par la chaleur directe du four.

Dans les fours à induction, cela devient impraticable, si l'on n'emploie pas certains procédés permettant de fournir la chaleur nécessaire au frittage.

On fait usage de plusieurs méthodes, dont l'une consiste à élever la température au moyen d'une masse de graphite suspendue à l'intérieur du four ; une autre consiste à utiliser le gabarit métallique qui constitue le mandrin du revêtement et qui est ensuite fondu lors de la première charge.

Dans un cas comme dans l'autre, la chaleur est fournie, par induction, par la bobine du four.

On préfère, pour les opérations basiques, un mélange de magnésite et de scories basiques affinées.

Dans le cas de garniture acide, on emploie le sable connu sous le nom, de « Tam Zircon », que l'on trouve en Floride, du ganister, schiste calciné, avec les liants nécessaires à l'état sec ou à l'état humide suivant les cas, liants constitués d'acide borique, de mélasse, de silicate de soude, etc... ; il faut veiller aux dimensions des grains pour obtenir une compacité convenable du composé après cuisson.

Les connaissances théoriques et pratiques sur les matières réfractaires sont maintenant telles que les échecs imputables à celles-ci, sont devenus relativement rares ; l'emploi, pour la fusion, de types de fours de plus grandes dimensions, peut être envisagé sans crainte de mécomptes à ce point de vue.

Comparaison des méthodes.

Les divers emplois des fours sont déjà très étendus ; fusion des aciers à outils de qualité supérieure, aciers pour aimants. alliages d'aciers résistant à la chaleur et à la corrosion, alliages de nickel-chrome, matériaux réfractaires spéciaux à haut point de fusion, tels que le carbure de tungstène-chrome-cobalt (point de fusion de 2 000 à 3 000° C), verre de silice et, en général, métaux précieux et non ferreux.

Parmi les avantages de ce procédé de fusion, on peut signaler, dans certains cas, l'amélioration de la qualité, la diminution des pertes à la fusion, la propreté, une facilité considérable de contrôle, la commodité des opérations.

Le taux auquel se développent les fours est actuellement très rapide. Ainsi, en 1925, la puissance des fours en fonctionnement n'atteignait guère qu'un millier de kilowatts; actuellement, elle atteint 25 000 kW en service et il a été construit des fours pour fusion de métaux d'une capacité de 1 500 kg.

La consommation d'énergie varie, bien entendu, considérablement suivant les conditions de l'opération, la nature et les dimensions de la charge. On est arrivé à des consommations d'énergie de l'ordre de 600 kWh par tonne dans des fours pour fusion d'acier de 500 kg à fonctionnement continu.

Le rendement thermique de l'échange d'énergie, représenté par le rapport entre la chaleur utilisée, sensible et latente dans le métal, et

l'équivalent calorique de l'énergie fournie aux barres omnibus des génératrices, varie de 50 à 60 pour cent suivant les conditions locales.

La perte de chaleur dans l'eau de réfrigération est de l'ordre de 10 à 20 pour cent et la perte dans les génératrices est de 11 à 22 pour cent suivant la nature et la capacité de l'équipement du four.

Le coût de l'opération, qui dépend de la lourde charge du capital investi, doit naturellement régir les applications du procédé.

Si on veut le comparer avec les autres, on se heurte à des données très compliquées, conditions inhérentes à l'usine, nature de la substance à fondre, sujétions générales entre la fusion et les autres opérations de l'usine. On peut, cependant, donner quelques indications générales.

En ce qui concerne le prix de l'énergie comparé à celui du combustible utilisé, par exemple, dans l'ancien procédé au creuset, le prix de l'énergie électrique est maintenant notablement plus bas que celui du coke pour des productions comparables.

La main-d'œuvre par tonne fondue est aussi notablement moindre, le four à induction à haute fréquence pouvant donner une production supérieure par homme et par heure.

Pour le prix des matières réfractaires, la différence est aussi très marquée en faveur du four à induction.

Les frais d'entretien sont généralement faibles avec le four électrique.

Les commodités d'emploi et de construction, les économies indirectes possibles en dehors de la fusion proprement dite, ont aussi une valeur qui, avec les facteurs précédents compense, pour un nombre croissant de procédés, l'élévation du capital investi.

Un autre facteur qui agit dans le même sens est la possibilité d'obtenir, dans un four de faible capacité, une forte production d'acier en un temps donné.

Si nous comparons le four à induction à haute fréquence à l'ancien four à arc pour fusion de l'acier, nous devons nous souvenir que le premier n'a jusqu'ici été utilisé que comme appareil de fusion, tandis que le second peut amener l'acier à un haut degré d'affinage.

Cette conséquence moderne de la grande découverte due à Faraday, apporte à l'industrie, pour la fusion des métaux et autres matériaux, une technique nouvelle et simplifiée, qui fait entrevoir l'inauguration d'une ère nouvelle dans l'industrie métallurgique.

L'ÉLECTRICITÉ A LA MAISON

UNE SERVANTE LABORIEUSE

La machine économise le travail

par Caroline HASLETT, C. B. E.

L'électricité, sous une forme ou sous une autre, affecte notre vie à tous, dans notre demeure, sur la voie publique, dans les mines, dans les usines, dans les bureaux, dans les véhicules, dans tous les procédés variés auxquels les gens ont recours pour épargner leur temps chez eux ou hors de chez eux, dans les sports, dans les plaisirs.

On peut dire que la vie est impossible sans le soleil, mais pour autant qu'une force quelconque puisse lui être substituée, c'est l'électricité qui la fournira.

Les gens se portent mieux, ils peuvent accomplir leur travail avec moins de fatigue, maintenir leur esprit plus alerte, grâce à un éclairage meilleur et mieux compris, qui supprime l'effort oculaire avec les inconvénients physiques qui en résultent.

L'emploi curatif de l'électricité apporte aussi de grands changements au bien-être des enfants; comme agent préventif ou curatif d'une maladie, personne ne peut actuellement indiquer une limite au potentiel du traitement par les radiations ultra-violettes, soit à la nursery, soit pour remonter l'organisme après un grand effort physique ou nerveux.

La transformation que l'électricité peut apporter à l'existence et aux travaux d'une maîtresse de maison est remarquable. Intelligemment employée, elle permettra, dans l'avenir, de supprimer à la maison tout travail pénible, tout travail manuel trop dur. Déjà elle a permis beaucoup de progrès en ce sens.

Le cuiseur électrique est devenu très efficace ; sa propreté et la facilité qu'il donne de régler la température au cours de la cuisson, intéressent vivement la ménagère moderne. Le radiateur électrique est bien conçu, sa mobilité et sa commodité d'emploi assurent sa popularité.

De nombreuses formes de chauffage électrique méritent maintenant d'êtres prises en considération, telles le chauffage par panneaux dans les murs ou le plafond, ou le chauffage tubulaire par éléments à basse température, placés en tubes, d'ordinaire le long des plinthes. Un trait caractéristique de ces nouvelles méthodes est de permettre le réglage au thermostat et de supprimer le gaspillage occasionné par les étourdis qui oublient d'ouvrir l'interrupteur.

Pour les nettoyages domestiques, l'électricité est le seul agent extérieur qui puisse aider la ménagère ; l'aspirateur électrique et le cireur de plancher sont souvent les premiers serviteurs électriques qui font leur entrée dans la maison.

L'élimination des corvées

La machine à laver ne semble pas être aussi répandue en Angleterre qu'en Amérique, en raison sans doute du prix élevé des appareils.

Lorsque la ménagère anglaise constatera l'énorme économie qu'on peut en attendre à la fois en argent et en travail, l'emploi de cette machine deviendra beaucoup plus large.

J'ai vu récemment une installation où le blanchissage d'une famille de six personnes est complètement fait à la maison en deux heures ; autrefois, une journée entière était nécessaire à la maîtresse de maison et à sa servante pour accomplir la même tâche laborieuse.

Le repassage aussi est facilité par les excellents fers électriques actuels dont beaucoup sont munis de coupe-circuits automatiques empêchant le gaspillage du courant. Dans les secteurs où les tarifs sont favorables, le chauffage électrique de l'eau donne une nouvelle possibilité d'économie de main-d'œuvre. Quelques sociétés de distribution ont un tarif spécial très bas pour le chauffage de nuit par accumulation, qui est un grand bienfait pour les maîtresses de maison.

La cuisine électrique moderne, bien établie, munie d'appareils électriques, fait appel à l'intelligence et flatte l'orgueil de la femme moderne, qui se refuse à consacrer des heures à une tâche fastidieuse que la machine peut faire beaucoup mieux qu'elle-même. Le ventilateur et la machine à coudre électriques, le mélangeur de pâtisserie et autres appareils à moteur lui épargnent nombre de travaux manuels. Les appareils électriques de table obtiennent beaucoup de succès en Angleterre, surtout auprès des célibataires des 2 sexes et de ceux qui, habitant un petit appartement, font cuire leur repas à table.

Le frigidaire s'impose dans les habitations modernes.

Tandis que la plupart des serviteurs électriques sont à la portée de

ceux qui ont de l'argent à dépenser, les pauvres gens qui, après tout, auraient plus besoin encore d'avoir chez eux de tels auxiliaires, se heurteraient de suite à l'obstacle insurmontable de faire exécuter l'installation intérieure nécessaire au service électrique. Quelques-unes des sociétés de distribution, parmi les plus entreprenantes, tournent la difficulté en adoptant des combinaisons d' « aide aux installations », grâce auxquelles la ménagère, au lieu d'avoir à payer de suite son installation, peut n'en payer que l'intérêt ou la payer à terme. Dans beaucoup de maisons neuves, les municipalités font faire l'installation électrique au moment même de la construction.

Un autre problème auquel le maître de maison doit faire face est celui de l'achat des appareils et ici encore plusieurs systèmes sont pratiqués qui permettent de les prendre en location ou de réaliser une location-vente moyennant des versements à termes modérés.

Au cours de plusieurs conférences récentes tenues dans tout le pays avec des compagnies de distribution, notre ministre des transports a exprimé le désir de voir se développer l'aide aux installations et les facilités de paiement, de manière que les services électriques puissent devenir accessibles à un plus grand nombre de consommateurs.

La multiplicité des tarifs dans l'ensemble du pays est très troublante pour une maîtresse de maison et l'on peut espérer qu'avant longtemps il sera possible d'obtenir, en même temps qu'une forme plus simple de tarifs, une plus grande uniformité des prix.

L'intérêt porté par les femmes au progrès de l'électricité pendant les six dernières années a sans aucun doute, incité les distributeurs et les constructeurs à satisfaire leurs désirs.

Le fait que les ingénieurs électriciens se sont enquis des préférences féminines pour établir les cuiseurs et d'autres appareils domestiques, nous assure, non seulement que ces appareils seront électriquement bien construits, mais qu'ils répondront aussi aux besoins de la ménagère.

L'Electricité à la campagne

L'intérêt que la *Fédération Nationale des Instituts Féminins* a pris à l'électrification rurale, devrait accélérer le développement de l'électricité dans les bourgs et dans les villages.

Le *Comité de l'Enseignement*, se rendant compte que la jeune fille d'aujourd'hui doit être pourvue de quelques connaissances en électricité a, au cours des deux dernières années, organisé pour les professeurs un court enseignement d'électricité domestique.

Si l'électrification domestique est sans aucun doute en rapide progrès dans ce pays, nous en sommes encore aujourd'hui à la période où elle ne peut répondre largement qu'aux conditions ménagères d'une génération antérieure.

Déjà, cependant, nos architectes commencent à concevoir des maisons construites pour le service électrique, où l'on disposera du maximum possible de lumière et de soleil grâce, soit au soleil lui-même, soit à la lumière électrique ; où le chauffage de la maison sera contrôlé par thermostat, où les nids à poussière et les travaux épuisants seront inconnus.

L'électricité, dans la maison future, simplifiera la tenue de notre intérieur, son éclairage et son chauffage et apportera sa propre contribution aux problèmes de l'architecture.

BAR-LE-DUC. — IMP. COMTE-JACQUET *Le gérant* : Alfred MAGNIER.